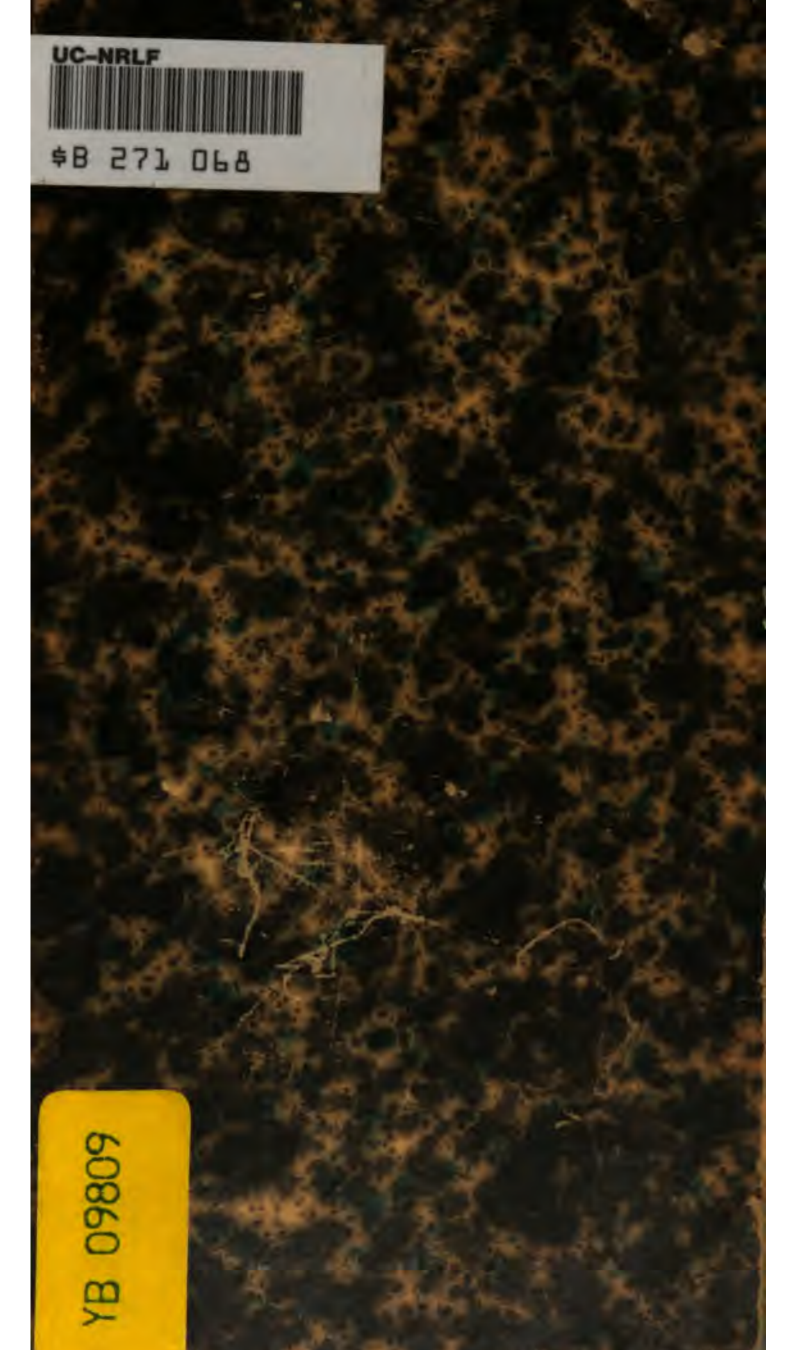
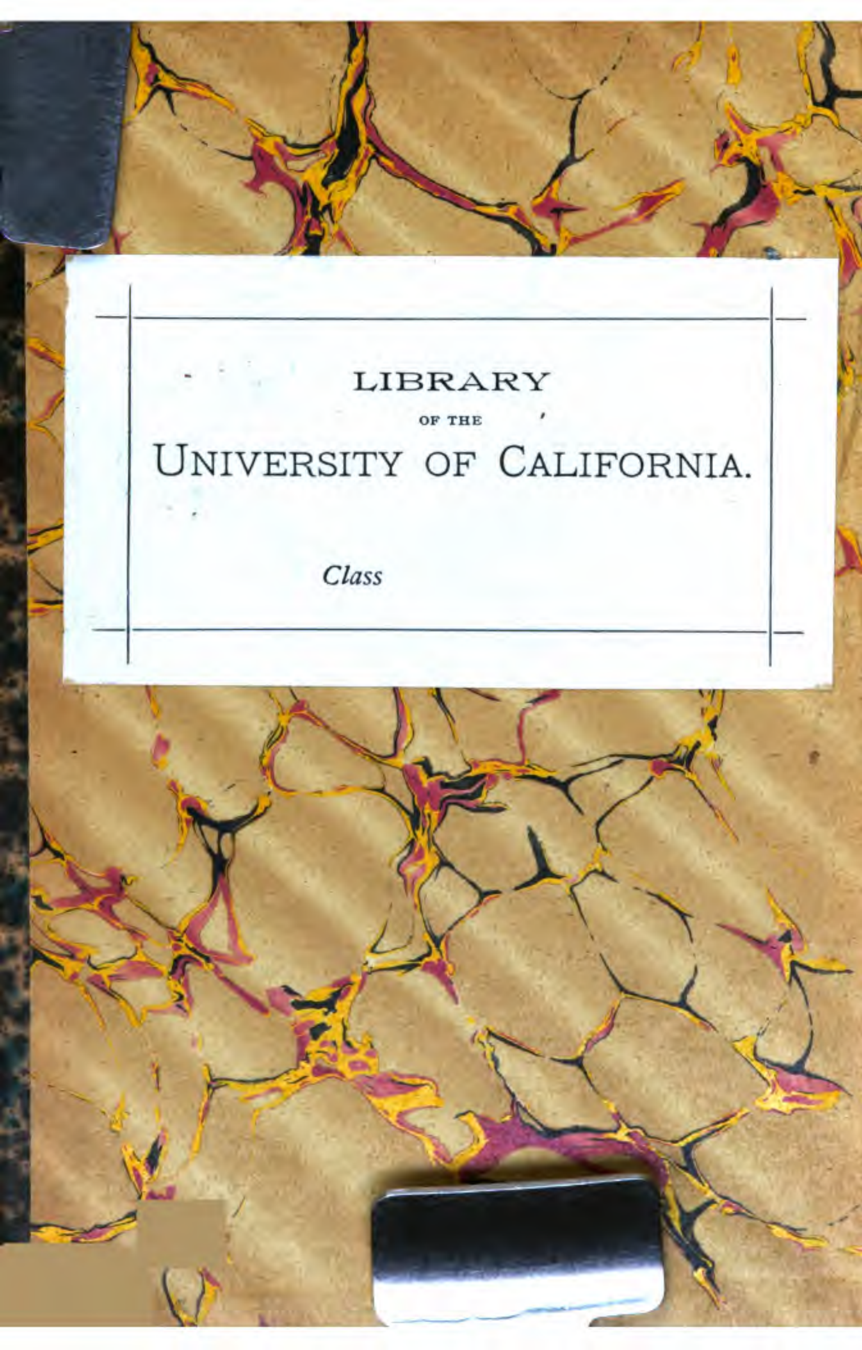

UC-NRLF
$B 271 068
YB 09809



LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF CALIFORNIA.
Class



*Bibliothèque de Philosophie scientifique*

BERNARD BRUNHES
Directeur de l'Observatoire du Puy de Dôme

# La Dégradation de l'Énergie




PARIS
ERNEST FLAMMARION, ÉDITEUR
26, RUE RACINE, 26

Sixième mille.



# La

# Dégradation de l'Énergie

*Bibliothèque de Philosophie scientifique*

BERNARD BRUNHES
Directeur de l'Observatoire du Puy de Dôme.

# La Dégradation de l'Énergie



PARIS
ERNEST FLAMMARION, ÉDITEUR
26, RUE RACINE, 26
1908

# La Dégradation de l'Énergie



## INTRODUCTION

### Le contre-sens universel sur le mot « énergie ».

#### § 1. — ÉNERGIE RICHESSE ET ÉNERGIE NON-VALEUR.

Dans un des dialogues de Socrate que Xénophon nous a conservés, on voit le philosophe poser à son disciple Critobule une série de questions sur la valeur et la richesse, avec cet art de faire trouver à son interlocuteur lui-même la réponse juste, qui caractérise la manière de Socrate :

— Tout ce qu'on possède n'est pas nécessairement une richesse : « Dirons-nous que les ennemis, que nous avons, font partie de nos possessions ? » Et serrant de plus près le problème de la définition de la richesse, Socrate poursuit :

« Tu m'as l'air d'appeler possession ce qui est utile à chacun. — C'est cela même, dit Critobule, car ce qui nuit je l'appelle perte plutôt que richesse. — Et si quelqu'un achetant un cheval, sans savoir le mener, tombe et se fait mal, ce cheval ne sera donc pas une richesse ?... N'en diras-tu pas autant des brebis ? Quand un homme qui ne sait pas en tirer parti éprouve une perte, les brebis sont-elles pour

lui une richesse? — Pas du tout, selon moi. — Ainsi, à ton avis, ce qui est utile est une richesse et ce qui est nuisible une non-valeur? — C'est cela. — La même chose, pour qui sait en user, est donc une richesse, et une non-valeur pour qui ne le sait pas. Ainsi, une flûte, pour un homme qui sait bien jouer de la flûte, est une richesse, tandis que pour celui qui ne sait pas, elle ne lui sert pas plus que de vils cailloux, à moins qu'il ne la vende. — Oh! alors, si nous vendons la flûte, elle devient une richesse; mais si nous ne la vendons pas et que nous la gardions, c'est une non-valeur pour qui n'en sait point tirer parti[1]. »

S'il était né quelques siècles plus tard, Socrate eût sans doute posé à son disciple la question suivante :

« Et dirons-nous aussi, Critobule, que l'*énergie* est une richesse? » Peut-être l'eût-il amené ainsi à réfléchir, et à soigneusement distinguer les idées très différentes qui sont généralement confondues sous ce terme commun *d'énergie*.

Les principes très simples posés dans l'*Économique* eussent suffi, tout d'abord, à confondre l'avocat facétieux qui, devant je ne sais quel tribunal, soutenait que son client n'avait volé personne et commis aucun délit en établissant, avant le compteur, un branchement sur une distribution électrique, de manière à emprunter l'électricité nécessaire pour éclairer ses lampes sans la payer. « Mon client, disait l'avocat, n'a pris que de l'électricité. L'électricité n'est pas une matière ; il n'a pas commis un vol. Pratiquée sur une distribution de gaz d'éclairage, la même opération ingénieuse était, sans nul doute, une fraude. Mais l'électricité ne rentre pas dans les objets que vise le Code. »

Le tribunal n'admit pas cette façon de voir; il

1. XÉNOPHON. *L'Économique*, chap. I.

jugea comme, sans doute, Socrate lui-même aurait jugé. Il estima que l'abonné avait fait prix avec la Compagnie d'éclairage pour une « richesse » déterminée, et s'était, ensuite, adjugé cette richesse sans la payer, ce qui est un vol.

Mais une personne quelque peu frottée de science se croira tenue de justifier cette sentence sage par des considérants plus scientifiques, et voici sans doute le langage qu'elle tiendra :

« Ce n'est pas la matière qui est précieuse pour nous, c'est l'énergie. Quand nous achetons du gaz d'éclairage, ce n'est pas pour lui-même, c'est pour l'énergie chimique de réserve qu'il renferme et que nous transformons, en le brûlant, en énergie calorifique ou lumineuse. Nous avons l'habitude de payer le gaz au mètre cube. Le gaz d'éclairage ordinaire fournit, en brûlant, 5.400 grandes calories au mètre cube, c'est-à-dire qu'un mètre cube employé au chauffage permettrait d'élever de 1 degré la température de 5.400 litres d'eau. Ces calories, c'est de l'énergie. Si nous avions pris l'habitude de payer nos notes de gaz à tant la calorie ou tant les 1.000 calories, ce serait plus logique. Cela nous permettrait de payer moins cher le gaz lorsque, réellement, il est moins bon.

« Il est si vrai que cette façon de compter serait plus correcte que, dans le cas des distributions d'électricité, qui ne sont entrées dans les mœurs que beaucoup plus tard, à une époque de culture scientifique plus avancée, les polices d'abonnement indiquent le prix de l'*énergie électrique*, et que les compteurs ne sont pas des compteurs d'électricité, mais des *compteurs d'énergie*. Nous payons, par exemple, 6 centimes l'hectowattheure, — unité moderne au nom bizarre, qui témoigne bien de l'éternelle résistance de la vie pratique à se plier aux systèmes rigidement logiques des savants, mais qui est bien une unité d'énergie,

équivalente à 86 grandes calories, — et l'abonné le plus ignorant a bien conscience que ce qu'il achète et ce qu'il paie, c'est de l'énergie.

« Les autres types de distribution d'énergie se multiplient d'ailleurs autour de nous, avec, tous, un caractère commun. Distributions d'eau sous pression, capables d'entretenir de petits moteurs hydrauliques à domicile, de véritables turbines en chambre, comme à Genève; distributions d'air comprimé; distributions même de vide, comme il en existe dans certains laboratoires bien outillés, et comme peut-être, demain, nous en verrons à Paris où, pour aujourd'hui, nous voyons déjà le vide vendu et porté à domicile! Se brancher frauduleusement sur une distribution de vide allant chez le voisin serait un délit incontestable, et pourtant ici le délinquant ne déroberait aucun objet matériel à la Société distributrice, *au contraire!* il lui déroberait seulement, sans la payer le prix convenu, une certaine dose d'énergie. La notion d'énergie est venue mettre de l'ordre et de l'unité dans l'idée que nous avons des divers profits possibles à tirer du monde extérieur. Ce qui nous est utile, dans ces divers cas de distributions, et ce qu'on nous vend à des tarifs définis, c'est de l'énergie. »

Il n'est nul besoin d'aller si loin pour affirmer le caractère illicite de l'acte qui consiste à brancher, avant tout compteur, une canalisation parasite sur une distribution de n'importe quoi. Mais le raisonnement qui précède est trop fidèlement conforme à celui que, d'une façon consciente ou inconsciente, ferait en pareille matière l'homme cultivé de notre temps, pour qu'on ne s'y arrête pas un instant.

Peut-être pourrait-on d'abord remarquer l'énorme disproportion entre les prix usuels de l'unité d'énergie qu'apporte le gaz et de l'énergie qu'apporte l'électricité. A 6 centimes l'hectowattheure, la distribution

d'électricité ferait ressortir la calorie, — la grande calorie, — à un quatorzième de centime; à raison de 22 centimes le mètre cube de gaz d'éclairage, la Compagnie du Gaz livrerait la calorie à moins de un deux centième de centime; si, en dépit d'une telle disproportion, l'électricité peut lutter, c'est apparemment que le prix de l'unité d'énergie ne dépend pas uniquement de la quantité totale de cette énergie, mais aussi de la forme sous laquelle elle est fournie, et que toutes les qualités d'énergie ne sont pas équivalentes. Cette différence de prix peut, je le sais, se rattacher à des raisons d'un tout autre ordre, et elle ne suffit certes pas pour fonder sur un raisonnement rigoureux la distinction entre les qualités différentes de l'énergie : elle peut tout au moins en suggérer l'idée.

Et si l'homme cultivé de notre temps croit avoir trouvé une réponse satisfaisante à la question de savoir quel caractère commun présentent les diverses distributions qui viennent lui offrir jusque chez lui des marchandises aussi différentes l'une de l'autre que le gaz, l'électricité et le vide, en disant que ces distributions viennent toutes mettre à sa disposition de l'énergie, je lui demanderai ce qu'il pense d'un nouveau genre de distribution urbaine installé déjà dans quelques villes des États-Unis, et d'une industrie tout à fait moderne, appelée peut-être à un grand avenir. Il s'agit de l'industrie frigorifique et des distributions urbaines de froid.

Le froid se fabrique et se distribue. On congèle depuis longtemps avec des machines à ammoniaque liquide les terrains boueux où l'on veut creuser et maçonner des puits de mine. On fabrique couramment aujourd'hui de l'air liquide. Quoi de plus naturel qu'un système de tuyaux où circule un liquide froid, incongelable, une *canalisation de saumure*, comme on dit en Amérique, allant rafraîchir l'été les

divers étages d'une maison confortable que chauffe l'hiver une circulation d'eau chaude? Refroidir un corps, c'est lui enlever des calories; le refroidissement se mesure par le nombre des calories soustraites. Comme l'industriel qui produit du froid ne voit pas les choses du même bout que celui qui produit du chaud, il est porté à prendre pour effet utile positif ce que l'autre compterait comme négatif : une calorie enlevée s'appelle, pour le producteur de froid, *une frigorie*. Comme il sait ce qu'il dépense pour actionner ses machines, il peut établir le prix de revient de la frigorie; s'il est possesseur d'une usine de distribution, il peut établir et inscrire sur des polices d'abonnement le prix de vente de la frigorie. C'est ainsi qu'à Saint-Louis, aux États-Unis, la frigorie revient environ à un centième de centime.

Que l'on veuille bien confronter ce simple fait avec la notion courante de l'énergie? On va répétant la formule populaire « La chaleur est une des formes de l'énergie », formule d'ailleurs juste, exprimant un fait vrai, qui permet d'évaluer en unités de chaleur, en *calories*, toutes les quantités d'énergie, que, sous les formes les plus diverses, nous présentent la nature et l'industrie. Mais en même temps on garde l'arrière-pensée que l'énergie est nécessairement quelque chose de précieux et d'utile. Comment s'expliquer dès lors que la suppression de calories, c'est-à-dire la suppression d'une quantité d'énergie, puisse être une opération que l'on juge profitable et que l'on paie à prix d'argent? Que je verse une somme à qui, par le vide, me permet de me débarrasser de poussières et de déchets qui m'encombrent, — que je paye le vide, — on le comprend encore, parce qu'avec le vide on m'apporte une force d'aspiration, et en définitive de l'énergie. Mais que je paye pour qu'on m'enlève de l'énergie, c'est ce qui heurte de front l'idée qu'on se fait d'ordinaire de l'énergie.

Il y a donc une énergie de déchet, une énergie usée, dont on n'a plus que faire et dont il y a tout avantage à se défaire !

Sans attendre même que naquît l'industrie du froid artificiel, ne connaissait-on pas des circonstances où l'on a de l'énergie, — c'est le cas de le dire, — à revendre, mais pour laquelle on chercherait vainement un acheteur? L'Européen transporté dans les régions tropicales ne reçoit du soleil que trop de calories : il n'a que faire de tant d'énergie, et ne souhaiterait que d'en abandonner une partie. Et si l'on s'avisait de lui poser la question qui revient sans cesse dans l'*Economique :*

« Dirons-nous que l'énergie aussi est une richesse? »

Il répondrait, à coup sûr, comme l'interlocuteur de Socrate :

« L'énergie surabondante, comme la chaleur d'un milieu trop chaud où l'on est plongé, est, certes, une non-valeur. Seule est une richesse l'énergie dont on peut tirer parti, l'énergie utilisable. »

Cette distinction en deux parts de l'énergie totale que possède un corps matériel : énergie utilisable et énergie de déchet, est grosse de conséquences. Si elle se trouve bien établie, et non pas seulement par une raison de bon sens, mais par la science la moins contestée, que voudra-t-on dire, désormais, quand on affirmera que, dans un monde fermé, soustrait à toute influence extérieure à lui, l'énergie totale se conserve et demeure en quantité invariable ? On voudra dire, tout simplement, qu'à l'intérieur de ce microcosme, la somme de l'énergie utile et de l'énergie usée garde une valeur constante, que ce que l'une gagne, l'autre le perd. Mais quelle est celle des deux variétés d'énergie qui augmente et quelle est celle qui diminue? Si les phénomènes qui se passent à l'intérieur de ce microcosme ressemblent à ceux que nous présente la nature que nous connaissons,

nous savons d'avance dans quel sens se feront les échanges. C'est toujours l'énergie de déchet qui augmentera aux dépens de l'énergie utilisable, et c'est celle-ci qui sans cesse diminuera. Que devient, dès lors, non pas *le principe* de la conservation de l'énergie, mais *l'intérêt* de la conservation de l'énergie?

La lecture des ouvrages de vulgarisation, la conversation avec des personnes cultivées : philosophes, médecins, hommes du monde, qui, sans être des physiciens, possèdent quelques notions de physique, l'interrogation des élèves qui ont terminé leurs études secondaires, — tout au moins jusqu'à ces toutes dernières années, — impose la constatation d'un fait extrêmement général. Quand on parle de la conservation de l'énergie, on commet sur le mot énergie un contre-sens : on sous-entend, par ce mot, ce que le physicien appelle énergie utilisable, et ce contre-sens est la raison profonde de l'importance que le public cultivé attache à l'idée de conservation de l'énergie. Quand le physicien affirme que ce qui reste permanent, c'est une certaine fonction qui se trouve la somme de l'énergie-richesse et de l'énergie non-valeur, son interlocuteur comprend que c'est l'énergie-richesse qui se conserve.

A vrai dire, la vulgarisation de notions scientifiques ne va jamais sans quelques inconvients dont il n'y a pas lieu d'être scandalisé, ni même surpris. Il faut toujours s'attendre à ce qu'un terme scientifique, quand il s'incorpore à la langue courante, ne garde pas le sens strictement déterminé que comporte sa définition. Faut-il renoncer, pour cela, à divulguer les conclusions de la science, et à s'efforcer d'en montrer l'importance, même à des personnes qui seraient incapables d'énoncer avec toutes les restrictions et les réserves nécessaires, les principes qu'elles invoquent? Faut-il ne reconnaître le droit de parler *du*

*poids* et de *la masse* qu'à ceux qui pourraient définir ces termes en toute rigueur? Ce serait une exigence d'autant plus excessive qu'il y a une foule de mots de la langue courante qui répondent à des idées communes à tous et que quelques-uns à peine sauraient définir correctement ; combien sauraient formuler en une proposition irréprochable ce qu'est l'espace et ce qu'est le temps? A mesure que les résultats de la science entrent dans le patrimoine commun des esprits, il est donc inévitable que certains mots scientifiques pénètrent dans le langage courant et qu'ils soient exposés à n'être pas très exactement compris. L'inconvénient qui en résulte est la contre-partie nécessaire de l'avantage que procure à tous et aux savants eux-mêmes l'enrichissement continuel du trésor des connaissances communes et la création d'une atmosphère scientifique générale qui rend possibles les progrès futurs.

Je pense donc qu'on serait très mal venu à dénier le droit de parler d'énergie à quiconque serait incapable de rédiger une dissertation correcte sur la définition de l'énergie. Seulement, ce qui est le devoir de l'homme de science qui s'aperçoit d'une confusion grave très généralement commise dans l'emploi d'un mot scientifique, c'est de la signaler sans se lasser et de mettre en garde contre elle.

Sur la signification du mot énergie, ce n'est pas une erreur de détail que nous avons à déplorer, c'est un véritable contre-sens. Dénoncé à de multiples reprises par des savants dont nous citerons les travaux, ce contre-sens date des origines mêmes de la science de l'énergie, et nous essaierons d'en tracer l'histoire.

## § 2. — « PUISSANCE MOTRICE » ET « ÉNERGIE ».

Quelque vingt ans avant la découverte de la loi d'équivalence entre la chaleur et le travail mécanique, l'esprit divinateur de Sadi Carnot avait introduit dans la science la notion profonde de « puissance motrice ».

Un simple regard jeté sur la nature qui nous entoure et sur nos machines nous montre certains phénomènes qui se produisent spontanément : chute de l'eau, passage de chaleur d'une chaudière à un condenseur, décharge d'une batterie d'accumulateurs. Ces phénomènes pourraient se produire en pure perte, sans qu'on en tirât d'effet utile ; mais ils sont susceptibles d'être utilisés. On peut les employer à provoquer les phénomènes inverses, à élever de l'eau, à charger des accumulateurs, à reporter de la chaleur d'un corps froid sur un corps chaud, à se créer ainsi une nouvelle réserve de *pouvoir d'action* sur le monde extérieur. C'est ce pouvoir d'action que Carnot appelle *puissance motrice*. C'est ce pouvoir d'action que, trop souvent, l'on prend pour l'énergie. Il peut arriver qu'en certains cas, l'augmentation d'énergie d'un système matériel soit égale à l'augmentation de sa puissance motrice : mais en général, l'énergie est tout autre chose, et, comme dans la production du froid artificiel, une soustraction d'énergie pourra correspondre à une augmentation de puissance motrice.

En 1824, Sadi Carnot s'est justement posé la question de savoir à quel prix on peut tirer de la chaleur un effet utile. Il a vu que c'est à la condition expresse de créer et de maintenir une différence de température. La nature tend à niveler les différences ; elle tend à l'homogénéité. Une hétérogénéité quelconque, artificiellement introduite, est créatrice de puissance motrice. Qu'à partir d'un milieu à température uniforme on vienne à créer du chaud ou du froid, l'utilité

pourra être la même : ce qui est précieux, c'est l'écart de température.

Un peu plus tard, lord Kelvin,—alors William Thomson, — méditant l'œuvre de Carnot, saura tirer de cette notion de prix et de valeur utile d'un intervalle déterminé de température une définition absolue de cet intervalle de température, indépendante de toute échelle thermométrique particulière.

L'œuvre de Carnot était inexacte en un point. Il avait cru que la chaleur, dans les machines à feu, se transporte d'un organe à un autre, mais ne se crée, ni ne se perd ; qu'elle produit du travail mécanique par la simple chute d'une température élevée à une plus basse, sans diminuer en quantité. Lorsque l'on découvrit que la chaleur se crée aux dépens du travail mécanique, et peut, à son tour, en disparaissant, produire une dose équivalente de travail, on ne comprit pas immédiatement que l'erreur commise par Sadi Carnot obligeait à modifier quelque peu la forme de son raisonnement, mais laissait subsister la conclusion. On oublia les idées de Carnot.

Ce qui est plus difficilement explicable, c'est qu'après que Thomson eut fait voir, par un premier exemple, quelle était la fécondité des idées de Carnot, en en tirant la notion de température absolue, — et après même que Clausius eut rectifié l'erreur de raisonnement de Carnot et, du même coup, établi le principe de Carnot sur des bases solides, — l'œuvre de Carnot resta longtemps ignorée, ou tout au moins mal connue. De l'indifférence du public savant à l'égard de l'œuvre de Carnot dans les années qui suivirent 1850, nous avons des preuves multiples. M. Chauveau racontait à l'Académie, au moment de la mort de lord Kelvin, comment, en 1855, il avait appris par hasard que le professeur de Glasgow consacrait plusieurs leçons à l'œuvre de Carnot dont, en France, « on soupçonnait à peine l'existence ». En 1867, Desains, auteur

de mémoires à bon droit classiques sur la chaleur rayonnante, était chargé d'un rapport sur les progrès de la science de la chaleur en France depuis le commencement du siècle : à aucun endroit, il ne cite le nom de Sadi Carnot.

En réalité, c'est beaucoup moins à cause de ses défauts que l'œuvre de Carnot resta longtemps ignorée, qu'à cause, au contraire, de sa supériorité. Carnot avait vu, sur un point fondamental, plus profond et plus juste que ses contemporains et que plusieurs de ses successeurs. Il avait deviné quelle est, dans les changements multiples que nous offre le monde physique, la grandeur qui nous importe, celle dont les variations déterminent le sens des phénomènes, celle qui, pour nous, constitue la vraie richesse : c'est ce qu'il avait nommé la *puissance motrice*. Mais il est clair que la puissance motrice d'un système matériel isolé va constamment en diminuant, qu'elle ne se conserve pas. Dans l'entourage et à l'époque de Carnot, on cherchait et on voulait quelque chose qui se conservât. On s'efforçait d'atteindre le permanent.

Lavoisier avait proclamé la conservation de la masse dans les réactions chimiques. Laplace avait montré la stabilité du système solaire ; Fourier avait célébré un monde « disposé pour l'ordre, *la perpétuité* et l'harmonie ». C'est dans cette atmosphère intellectuelle qu'a surgi, comme par génération spontanée, en trois points de l'Europe savante, le principe de la conservation de l'énergie. Sans diminuer le mérite des physiciens qui reconnurent par des voies indépendante l'équivalence de la chaleur et du travail mécanique, on peut voir dans cet accord l'indice que les esprits étaient mûrs pour cette idée. « Les admirables travaux de physique mathématique, a dit fort justement M. H. Poincaré, entrepris à cette époque par Laplace, Cauchy, Lamé, Poisson, Fourier, paraissent avoir exercé une influence considérable sur les contempo-

rains et les successeurs de Carnot ». L'idée de forces centrales, de molécules obéissant à des lois de stabilité, d'un monde physique où quelque chose se conserve comme dans le monde céleste, devait inévitablement conduire, tôt ou tard, à la découverte des grandeurs qui, dans un monde isolé, possèdent la propriété de l'*invariance*, et, en particulier, de l'*énergie*.

Tout était parfait si l'on se fût borné à la recherche légitime des *invariants* d'un système matériel. Mais on avait la préoccupation de trouver une grandeur qui possédât à la fois la propriété de se conserver et celle de représenter, pour nous, le prix et la valeur d'un système. Il n'existe pas de grandeur douée de ces propriétés incompatibles. C'est peut-être regrettable, mais c'est ainsi. La « puissance motrice » représente bien le prix d'un système matériel, mais elle ne se conserve pas. L' « énergie », au contraire, se conserve, mais ne représente nullement la valeur du système matériel. Le problème de la recherche d'une grandeur ayant les deux propriétés à la fois est impossible. Carnot avait eu conscience de cette impossibilité. Il ne pouvait être compris d'hommes qui s'obstinaient à chercher la solution du problème, bien plus, qui ont cru l'avoir résolu par la proclamation de la *loi de la conservation de l'énergie*.

A la vérité, le terme d'*énergie* est introduit dans la science par un des rares physiciens de cette époque qui ont médité et compris Carnot, par William Thomson lui-même, qui n'imagine pas que l'introduction de ce terme pourra nuire un jour à la divulgation du principe de Carnot. Il donne dès le début de ce qu'il nomme « l'énergie mécanique », et que Clausius appellera simplement « l'énergie », une définition irréprochable. Quand la vapeur agit dans le cylindre d'une machine à vapeur en poussant le piston, elle travaille; pour amener l'eau de la chaudière à l'état de vapeur,

on a dû lui fournir de la chaleur; en passant de l'état d'eau froide à l'état de vapeur saturée ou surchauffée, la masse fluide a acquis de l'énergie. Par définition, l'augmentation d'énergie d'une masse fluide qui change d'état est l'excès de la chaleur qu'on a dû lui communiquer sur le travail extérieur qu'elle a déjà accompli, ou, pour être plus correct et n'employer que des unités cohérentes, *l'augmentation d'énergie de la masse matérielle est l'excès, sur le travail accompli par elle, de l'équivalent mécanique de la chaleur qu'on lui a fournie.*

C'est uniquement la *variation d'énergie* que Thomson définit de la sorte, quand on passe d'un état à un autre; ce n'est, en aucun cas, la valeur absolue de l'énergie totale que possède un corps dans un état déterminé. Par une prudence où l'on serait tenté de voir une étonnante prescience, Thomson déclare que nous pouvons mesurer la variation d'énergie d'un gramme d'eau quand elle se vaporise ou se condense, mais que nous ne saurions atteindre à la connaissance de l'énergie réelle de ce gramme d'eau; que cette énergie réelle peut être quelconque et *pourrait même devenir infinie* sans que les calculs qui portent sur les variations d'énergie en fussent atteints.

Si donc les découvertes contemporaines nous révèlent l'existence d'énormes provisions d'énergie dans des quantités toutes petites de matière, nous pouvons, jusqu'à preuve directe du contraire, garder notre entière confiance aux conclusions de la thermodynamique; l'objection qu'on serait tenté de tirer de l'énormité des énergies intraatomiques ne porte pas contre des déductions que lord Kelvin a pris, en 1851, l'incroyable précaution de mettre à l'abri de toute hypothèse sur la valeur absolue, finie ou infinie, de l' « énergie ».

Si plusieurs corps sont en présence, ils échangent

entre eux chaleur et travail : les quantités échangées sont complémentaires. Les variations d'énergie de deux corps matériels en présence, isolés du reste du monde, sont égales et contraires : la somme algébrique de leurs variations est nulle, c'est-à-dire que leur énergie totale ne varie pas.

Mais au moment même où l'on formule le principe, il semble que l'on voie s'évanouir la profonde signification réelle qu'on en avait attendue. Helmholtz avait célébré avec enthousiasme le principe de l'équivalence dans son discours bien connu sur la « conservation de la force », où l'on croit entendre résonner l'écho des périodes éloquentes de Laplace et de Fourier sur l'universelle stabilité des choses et sur le monde disposé pour la perpétuité et l'harmonie. Thomson, lui, ne met pas longtemps à reconnaître que, si ce qu'il vient d'appeler « l'énergie mécanique » se conserve — au sens arithmétique du mot, — la somme des effets utiles qu'un monde isolé reste capable de produire, va constamment en diminuant. Quelques mois à peine après avoir défini « énergie mécanique », ce que nous appelons aujourd'hui « énergie », Thomson proclame « la tendance universelle à la dissipation de l'énergie mécanique dans la nature ».

Les époques de grande fécondité vont rarement sans quelque confusion dans les idées et dans les mots. Au moment où s'élabore la science que Rankine appellera l'*énergétique*, on tâtonne avant d'arriver au choix des termes qui deviendront définitifs. Thomson se préoccupe déjà du départ à faire entre les diverses formes d'énergie, et distingue de « l'énergie mécanique totale » « l'énergie mécanique d'espèce non-thermique » ; bientôt il abandonnera cette formule un peu longue pour adopter l'expression « admirable » d'*énergie potentielle* que vient d'employer Rankine et que critique J. Herschel. *Énergie potentielle*, *énergie*

*actuelle*, ces termes ont fait fortune, bien que Thomson et Tait aient substitué plus tard à l'épithète d'*actuelle*, celle de *cinétique* qui a prévalu. Energie de puissance, énergie de mouvement, tels semblent être désormais les deux termes entre lesquels se feront les échanges réciproques d'énergie, dont la somme ne varie pas ; et à l'aide de ces mots, Rankine cherche à formuler la loi générale qui régit les transformations de l'énergie dans le monde.

Mais, devant l'adoption du nouveau langage scientifique, on voit les créateurs de cette terminologie comme embarrassés et inquiets de ce succès même. Nous avons vu Thomson affirmer en même temps la *conservation* et la *dissipation* de l'énergie, comme si, à ce moment, dans son esprit, se mêlaient les deux notions de l'énergie, telle que le physicien la définit et telle que le public la comprend. C'est encore Rankine, apercevant les conséquences pour l'avenir du monde matériel de cette déperdition continuelle des formes utiles de l'énergie, et imaginant, pour les éluder, l'ingénieuse mais insoutenable hypothèse de la reconcentration de l'énergie dans l'univers. C'est le même Rankine, le créateur de l' « énergétique », qui se plaindra, quelques années plus tard, que le second principe de la thermodynamique ne soit ni vulgarisé, ni même connu, alors que le premier principe est vulgarisé à profusion, mais compris à faux. C'est Maxwell, essayant déjà de réagir contre les idées erronées que l'on se fait de la conservation de l'énergie et, pour y arriver, introduisant la notion nouvelle d'énergie utilisable, « available energy », dont M. Gouy devait plus tard montrer tout le parti à tirer pour un exposé rationnel et clair de toute la thermodynamique. Maxwell se montre à ce point préoccupé de ne pas donner prise au contre-sens universel, qu'il ne recule pas devant l'insertion d'un très long sous-titre en tête d'un petit livre populaire, et qu'il intitule son

admirable Traité de la chaleur : « Traité de la chaleur, leçons élémentaires sur la thermométrie, la calorimétrie, la thermodynamique et la dissipation de l'énergie ». C'est encore Thomson, échangeant avec Tait des lettres où il se demande par quel nom on pourrait désigner la propriété qui signifie qu'un système matériel est bon à quelque chose et qui mesure le maximum de travail utile qu'on en pourra tirer, et, ne songeant plus, semble-t-il, à la « puissance motrice » de Carnot, proposant, sans s'y arrêter, le vocable de « motivité thermodynamique ». C'est Tait enfin, s'avisant encore d'un mot nouveau pour énoncer une idée décidément malaisée à enfoncer dans les cerveaux, et déclarant, dans une de ses conférences sur les progrès récents de la physique, que, dans toutes les transformations d'énergie, cette énergie baisse de qualité, et que, sans cesser de se conserver, elle se détériore et se *dégrade*.

## § 3. — L'EXPRESSION « DÉGRADATION DE L'ÉNERGIE ».

Sous cette forme, « dégradation de l'énergie », l'idée fondamentale qu'implique le second principe de la thermodynamique se prête avec une particulière aisance à l'exposition. C'est cette forme que nous avons adoptée nous-même dans des articles déjà anciens, puisque les premiers datent de treize ans. C'est cette forme qu'ont sanctionnée récemment les programmes de l'enseignement secondaire.

Ce n'est pas qu'il fût impossible de recourir à d'autres méthodes d'exposition. Peut-être vaudrait-il mieux, comme l'a proposé M. Le Chatelier, faire table rase de toutes les idées, vraies ou fausses, qu'a introduites le mot *énergie*, et se borner à reprendre, en la développant et la rectifiant au besoin, l'idée fondamentale de Carnot. Il est possible de

donner de toute la thermodynamique un exposé cohérent qui repose tout entier sur la considération de la puissance motrice : le lecteur aperçoit alors d'une façon immédiate dans quelles circonstances exceptionnelles il y a conservation de la puissance motrice, et dans quels cas, au contraire, qui sont la règle, il y a diminution de cette puissance motrice. Le principe de la conservation de l'énergie ne vient plus qu'en dernier lieu, et il ne risque ni d'apparaître, comme étant le seul, ni d'être pris pour le principe de la conservation de la puissance motrice.

La méthode serait assurément excellente, s'il était possible de faire abstraction des cinquante années pendant lesquelles tout le monde s'est servi du mot énergie. Etant données les habitudes actuelles des esprits, il nous paraît préférable de prendre précisément pour point de départ la conservation de l'énergie, et d'étudier ensuite ce qui, dans l'énergie, ne se conserve pas. Ce qui ne se conserve pas, c'est *l'énergie utilisable* de Maxwell et de M. Gouy. Mais il nous semble préférable encore, si l'on recherche une formule simple qui se grave dans l'esprit, de parler de *dégradation :* conservation et dégradation apparaissent ainsi comme les deux aspects de la loi générale des transformations de l'énergie : maintien de la quantité, perte de la qualité. Si l'on ne craignait pas, à propos *d'énergie*, d'employer les mots de *matière* et de *forme* de l'ancien vocabulaire philosophique, on pourrait résumer la loi des transformations de l'énergie dans le vers célèbre de Ronsard :

La *matière* demeure et la *forme* se perd.

Cette double loi des transformations de l'énergie représente ainsi, par ses deux aspects, ce que l'on appelle : *les deux principes de la Thermodynamique. Le premier principe*, — ainsi désigné parce qu'il a

reçu le premier sa forme définitive, quoiqu'il ait été en réalité découvert après le second, — est le *principe de l'équivalence de la chaleur et du travail*, ou, sous sa forme la plus générale, le *principe de la conservation de l'énergie*. Le second principe est précisément celui dont il est question dans ce livre : c'est le principe découvert par Carnot, rectifié par Clausius, et qui, généralisé, est devenu le *principe de la dissipation ou de la dégradation de l'énergie*. Nous préférons parler de dégradation, parce qu'en énonçant ainsi le second principe de la Thermodynamique, nous énonçons une idée qui complète, et, si l'on veut, qui corrige, celle de conservation : mais compléter et corriger n'est pas contredire. Plus encore que les Anglais, les Français seraient choqués d'entendre proclamer simultanément la *conservation* et la *dissipation* de l'énergie. Avec le mot de dégradation, l'absence de contradiction apparaît.

Nous emploierons donc, en quelque sorte, par symétrie, pour désigner le second principe de la thermodynamique, l'expression « principe de la dégradation de l'énergie ». Mais cette symétrie de formules ne doit pas masquer une différence fondamentale. Le « premier principe » se traduit toujours par une égalité. Le second se traduit, dans le cas général, par une inégalité.

Mais cette inégalité a, pour cas-limite, une égalité. On peut trouver des circonstances où l'égalité est pratiquement atteinte. La seule chose qui soit tout à fait impossible, c'est de changer le sens de l'inégalité. Pour parler le langage de Carnot, il est des cas où la « puissance motrice » se conserve : mais comme, d'ordinaire, elle diminue, et qu'elle n'augmente jamais, elle ne saurait, au total, que diminuer.

Les cas exceptionnels où le second principe se traduit par une égalité ont une importance théorique considérable. Ils donnent prise au calcul, et per-

mettent de constituer la thermodynamique des phénomènes dans lesquels la puissance motrice ne diminue pas. C'est à cette étude que l'on s'attache surtout dans l'enseignement, et l'on a grandement raison; car elle fait connaître avec précision la limite que, dans l'utilisation pratique de nos moyens d'action sur le monde matériel, nous pourrons à la rigueur atteindre, mais que nous ne pourrons jamais dépasser.

Nous réserverons d'ordinaire le nom de principe de Carnot, à l'énoncé du second principe de la thermodynamique, *dans le cas-limite où il se traduit par une égalité;* mais il nous arrivera, à l'occasion, sans que nous pensions en cela commettre une erreur, de prendre ce terme « principe de Carnot » dans un sens plus général, et comme synonyme de *principe de la dégradation de l'énergie.*

En quoi consiste ce principe de la dégradation de l'énergie ? Quelle est sa portée? Quelles restrictions comporte-t-il? Les découvertes modernes sur les phénomènes radioactifs ne le remettent-elles pas en question? Est-il ou n'est-il pas compatible avec la conception cartésienne qui réduit tous les phénomènes physiques au mouvement? Tel est l'objet du présent livre.

# PREMIERE PARTIE

## CLASSIFICATION DES DIVERSES FORMES D'ÉNERGIE

---

## CHAPITRE PREMIER

### Exposé général de la loi de dégradation de l'énergie.

---

#### § 1. — CONSERVATION ET TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE.

« Rien ne se crée, rien ne se perd. » — Telle est la formule brève et significative qui, pour bien des gens, résume la « Science moderne ». Appliquée à la matière, elle exprime le *principe de la conservation de la matière*, qui est la loi primordiale de la chimie; appliquée à l'énergie, elle résume le *principe de la conservation de l'énergie*, qui est une loi essentielle de la physique.

Le défaut de ces formules est d'être trop faciles à retenir. Quelque paradoxal que puisse être un pareil reproche à l'adresse d'un énoncé mnémotechnique, je n'hésite pas à dire qu'il en résulte un double inconvénient. Si l'effort de mémoire est trop faible, il n'a pas comporté un effort de réflexion suffisant : on retient une phrase, mais on méconnaît parfois, ou

l'on altère, le sens des mots. L'on oublie, surtout, que la science ne tient pas tout entière en un énoncé; l'on oublie qu'à côté des vérités qu'on se rappelle ainsi, existent d'autres vérités essentielles, connexes des premières, susceptibles de les compléter ou d'en restreindre le sens, et qui restent arbitrairement ignorées.

Il est bien exact qu'en un système matériel clos de toutes parts, les actions chimiques qui peuvent se produire à son intérieur ne sauraient en aucun cas altérer la quantité de matière qui s'y trouve : dans les gaz chauds qui proviennent d'une combustion, on retrouve intégralement tout le poids qu'a perdu le corps brûlé. Il convient peut-être de réduire aujourd'hui le principe aux actions chimiques *ordinaires*, puisque certains phénomènes tels que le rayonnement des corps radioactifs semblent bien mettre en évidence une perte réelle de masse. Il est encore exact qu'en un système matériel complètement isolé du reste du monde, les actions mécaniques et thermiques dont il peut être le siège ne sauraient empêcher la quantité totale d'énergie de rester constante : ce qui est dépensé en énergie d'un côté se trouve regagné d'un autre côté. Dans quelle mesure sommes-nous en droit d'étendre ces résultats à l'ensemble de l'univers matériel? La question mériterait certes quelque examen, bien qu'on la tranche d'ordinaire sans de fort longues hésitations. Ce qu'on peut dire tout au moins, c'est que, si cet univers matériel constitue un ensemble limité, il ne saurait y avoir, tant qu'on le suppose soustrait à toute influence extérieure à lui, ni création ni destruction de matière, — ceci sauf la restriction précédemment formulée, — ni création ni destruction d'énergie.

L'énergie se trouve dans le monde sous des formes diverses : énergie de mouvement ou *cinétique*, que possèdent les corps célestes animés de vitesses ver-

tigineuses, — énergie chimique, contenue en réserve dans les immenses dépôts de combustibles des planètes comme la nôtre, — énergie calorifique que rayonnent dans l'espace de puissants foyers tels que le soleil. Un astre errant, comète ou bolide, vient-il à passer trop près d'un centre d'attraction autour duquel il gravitait, il est précipité sur lui : il y a transformation en énergie calorifique de l'énergie de mouvement que possédait l'astre au moment du choc. Inversement, la chaleur que répand le soleil sur le globe y devient la source de presque toute l'énergie dont nous disposons : la chaleur solaire est la cause essentielle de la circulation des vents et de la circulation des eaux qui, en amenant aux montagnes la neige et la pluie, produisent les rivières et les fleuves, et nous font retrouver sous forme d'énergie mécanique utilisable pour notre industrie une part de l'énergie calorifique reçue. La radiation solaire a joué encore un rôle capital dans la constitution des dépôts de charbon que renferme notre sous-sol, d'où nous tirons l'énergie chimique, dont nous faisons à volonté de l'énergie calorifique. Notre système solaire, comme le reste du monde, offre ainsi le spectacle de changements continuels dans les formes qu'affecte l'énergie ; quant à l'énergie elle-même, à la condition expresse de considérer tout l'ensemble, et non pas uniquement notre terre ou notre système planétaire, elle peut être regardée comme en quantité invariable ; l'énergie ne « se crée ni ne se perd ».

Mais si l'on prétend dire que dans l'univers, — ou, pour nous borner à un cas hors de contestation, dans un système matériel limité, abandonné à lui-même, — il n'y a jamais, en ce qui concerne l'énergie, *rien* de créé, *rien* de perdu, on avance manifestement quelque chose de tout à fait faux.

« L'énergie ne se perd pas » ; mais dans l'énergie

que possède un système isolé, livré à lui-même, il y a *quelque chose* qui se perd. Ce *quelque chose*, c'est peut-être précisément ce que bien des esprits croient voir — ou entrevoir — derrière le mot d'*énergie*. Ce n'est pas, à coup sûr, ce que le physicien appelle *énergie :* de cela, la dose reste invariable ; ce qui se perd, c'est l'*énergie utilisable* ; ce qui diminue sans cesse, c'est la fraction de l'énergie totale susceptible de servir à quelque chose. Si l'on a le droit de parler d'une quantité totale d'énergie fixe dans l'univers, on a le même droit de parler de l'énergie utilisable de l'univers et d'affirmer que cette énergie utilisable est chaque jour moindre qu'elle n'était la veille. Il n'y a pas *déperdition* d'énergie, mais il y a *dégradation* de l'énergie.

Dans une de ses réponses aux objections de Clarke, Leibnitz donne une jolie comparaison qui prouve avec quelle sûreté d'instinct il pressentait la loi de la conservation de l'énergie. Il s'agit du choc entre corps non élastiques ; après le choc, il semble qu'il y ait eu ce qu'on appelait alors « perte de force ».

« On m'objecte que deux corps mous, ou non élastiques, concourant entre eux, perdent leurs forces. Je réponds que non. Il est vrai que les touts la perdent par rapport à leur mouvement total ; mais les parties la reçoivent, étant agitées intérieurement par la force du concours. Ainsi ce défaut n'arrive qu'en apparence. Les forces ne sont pas *détruites*, *mais dissipées parmi les parties menues*. Ce n'est pas les perdre, *mais c'est faire comme font ceux qui changent la grosse monnaie en petite.* »

La transformation du travail mécanique en une quantité équivalente de chaleur, c'est donc, pour Leibnitz, un changement « de grosse monnaie en petite ». Il est possible de pousser l'analogie plus loin que Leibnitz n'y a songé. En tout pays du monde, on peut échanger un louis d'or pour de la monnaie de

billon ; il n'est pas partout également facile d'obtenir de l'or pour une somme équivalente de monnaie divisionnaire. Il s'en faut d'ailleurs que, de tout point, la comparaison soit exacte. Dans la nature, le cours du change est uniforme et invariable : 425 kilogrammètres de travail mécanique valent toujours 1 grande calorie, et 1 grande calorie vaut toujours 425 kilogrammètres. La nature ne prétend jamais réaliser un bénéfice dans les transformations d'énergie qu'elle permet : seulement elle ne se montre pas également disposée à laisser le change se faire dans les deux sens ; et, dans ses caisses, elle réalise progressivement la transformation totale « de la grosse monnaie en petite ».

C'est là un grand fait qui ne saurait laisser indifférente une théorie *mécanique* de la chaleur. Si la chaleur n'est qu'un mode de mouvement, si elle est un mouvement satisfaisant aux lois ordinaires de la mécanique, comment expliquer cette préférence de la nature qui ne permet pas de transformer avec une égale aisance le mouvement visible en chaleur et la chaleur en mouvement visible? La mécanique pure nous offrait, dans ses lois, un cas particulier et comme un pressentiment de la loi de la conservation de l'énergie; la mécanique pure ne nous avait rien montré qui ressemblât, de près ou de loin, à la *dégradation* de l'énergie. Le mécanisme, loin d'avoir permis de prévoir ce second principe, comme il avait fait prévoir le premier, se trouve donc embarrassé pour s'accorder avec lui. Entre le principe expérimental et le système hypothétique, bien loin de pouvoir démêler une harmonie établie d'avance, on est réduit à essayer, après coup, des tentatives de conciliation. Quel avenir est réservé à ces tentatives? J'ai déjà dit, il y douze ans, en pleine crise du mécanisme, qu'à mon sens, c'était s'avancer beaucoup que d'en prédire, comme on l'a fait, l'échec inévitable. Mais je ne crois pas

qu'on puisse dire non plus qu'aucune d'elles ait, à l'heure actuelle, pleinement réussi. Nous essaierons de donner une idée de ces essais de conciliation, et, tout au moins, de montrer les divers aspects du principe de la dégradation de l'énergie, et de confronter les idées qu'il implique avec celles qu'implique la conception mécaniste du monde physique.

### § 2. — LES « TRANSFORMATIONS NATURELLES » ET LES « TRANSFORMATIONS ARTIFICIELLES ».

Il suffit de choquer une pierre contre une autre pour produire de la chaleur en dépensant du mouvement. Je dois à la vérité de reconnaître que je n'ai jamais vu, pour ma part, de sauvage allumer du feu en frottant l'une contre l'autre deux baguettes de bois; mais des témoins dignes de foi affirment en avoir vu. Ce qui est certain, c'est que, dès l'aurore de la civilisation, on a su réaliser la transformation intégrale de l'énergie mécanique en énergie calorifique.

Ni l'antiquité, ni le moyen âge n'ont su, au contraire, résoudre le problème inverse : mettre en mouvement une machine à élever des fardeaux ou une pompe, moyennant une dépense de combustible. Il faut arriver jusqu'à Denis Papin pour trouver, dans la machine à vapeur, une véritable machine à feu fonctionnant régulièrement. S'il y a *équivalence* entre la chaleur et le travail, entre 1 grande calorie et un travail de 425 kilogrammètres, il n'est nullement *équivalent* d'avoir à sa disposition 425 kilogrammètres ou d'avoir à sa disposition 1 calorie. Un projectile en mouvement, un wagon lancé sur une voie possèdent de l'énergie mécanique : en recevant le projectile dans une cuve pleine d'eau, en arrêtant le wagon avec un frein, on absorbe sous forme de chaleur l'intégralité

de l'énergie mécanique qu'ils avaient reçue. D'une source de chaleur qui fournit une calorie, on ne peut jamais, au contraire, tirer qu'une fraction, toujours assez faible, du travail mécanique équivalent : nos machines à vapeur ne transforment jamais en travail plus de 10 à 15 pour 100 de la chaleur que dépense la chaudière.

Le reste, les 90 pour 100 ou 85 pour 100, ne se *perd* pas, mais le reste est inutilisé. La grande part de la chaleur de la chaudière passe dans le condenseur; elle s'en va dans l'atmosphère avec la vapeur et la fumée, comme c'est le cas dans la locomotive : c'est de l'énergie *gaspillée*. Le génie de Sadi Carnot a su reconnaître que, si ce gaspillage peut être quelque peu réduit par les perfectionnements de construction, il ne saurait être, en aucun cas, évité; que ce gaspillage, loin de tenir uniquement aux défauts pratiques de nos machines, est la condition théorique indispensable de leur fonctionnement. De même qu'il faut une chute d'eau pour faire marcher un moteur hydraulique, de même il faut une chute de chaleur, tombant d'une source chaude à une source froide, d'une chaudière à un condenseur, pour faire marcher un moteur thermique. Toute machine à feu, qu'elle soit à air chaud, à vapeur, à gaz ou à pétrole, comprend comme organes essentiels une chaudière et un condenseur : à la condition de consacrer une partie de la chaleur produite dans la chaudière à retomber dans le condenseur, — mais à cette condition seulement, — on peut transformer en travail mécanique l'autre partie de la chaleur dépensée dans la chaudière. Cette restriction apportée à la libre transformation de la chaleur en travail ne doit pas être attribuée à des imperfections de nos machines : elle tient à la nature même des choses.

Ainsi la chaleur est, comme le travail mécanique, de l'énergie ; mais c'est de l'énergie de *qualité infé-*

*rieure*. Une source de chaleur qui est à une température plus élevée qu'une autre versera de la chaleur de *qualité* supérieure ; mais, pour élevée que puisse être la température de la source, la chaleur qu'elle verse ne laissera pas d'être de l'énergie de qualité inférieure à l'énergie mécanique. On peut dire que les modifications qui sont *naturelles* sont celles qui, sans altérer jamais, bien entendu, la *quantité* d'énergie, la changent en une énergie de *qualité* inférieure. La chute de la chaleur qui tombe d'un corps plus chaud sur un corps plus froid est un exemple de transformation naturelle; et de même la transformation de travail mécanique en chaleur. Les transformations inverses, transformation de chaleur en travail, ou transport de chaleur d'un corps froid sur un corps chaud, sont des *transformations artificielles*. L'expérience nous apprend que ces transformations artificielles ne se réalisent jamais d'elles-mêmes ; *elles ne peuvent s'accomplir que moyennant la réalisation simultanée d'une transformation naturelle au moins équivalente*. Telle est la forme sous laquelle Clausius a énoncé le principe de Carnot.

Dans la machine à vapeur, on fait tomber une partie de la chaleur de la chaudière dans le condenseur : transformation naturelle qui rend possible la transformation artificielle concomitante d'une autre partie de la chaleur de la chaudière en travail mécanique. La transformation artificielle, qui consiste à transporter de la chaleur d'un corps froid sur un corps chaud, est celle que réalisent les machines frigorifiques : elles permettent de refroidir un corps déjà plus froid que les corps qui l'entourent, et d'en extraire encore de la chaleur pour la répandre sur le milieu ambiant plus chaud ; nous verrons plus loin comment cette transformation artificielle s'obtient moyennant une transformation naturelle de travail mécanique en chaleur.

Si les transformations artificielles exigent toujours une transformation naturelle corrélative, la réciproque n'est pas vraie. Une transformation naturelle n'a pas besoin d'être *compensée*. Toute seule et d'elle-même, la chaleur tombe des corps chauds aux corps froids; toute seule et d'elle-même, l'énergie mécanique tombe à l'état inférieur d'énergie calorifique. Un système de corps matériels, abandonné à lui-même, présentera toujours, au bout du compte, un excès de transformations naturelles non compensées. Pour employer un langage moins scientifique, ce système tend vers un état final où tout mouvement visible disparaît pour faire place à une chaleur qui se répartit uniformément, assurant en tous les points une rigoureuse égalité de température; repos, égalité de température, telles sont les conditions finales que réalisent progressivement les transformations spontanées. Si c'est là aussi l'état final réservé à l'univers, il est clair que ce sera la mort pure et simple: sans mouvement, sans inégalités de température, nul rayonnement, nulle vie possible. Dans ce monde éteint et mort, il y aurait pourtant la même somme d'énergie totale qu'aux premiers jours de son existence. Seulement cette énergie serait passée tout entière à l'état d'énergie inutilisable.

Encore une fois, l'on ne saurait, sans se heurter à des difficultés métaphysiques, affirmer que ce résultat s'applique tel quel à l'univers entier. Il y aurait témérité, peut-être, à prédire qu'il atteindra à jour fixe cet état-limite que caractérisent l'immobilité et l'uniformité de température. Ce qui seulement est hors de doute, *c'est que le monde marche en ce sens.*

Il y a des personnes, en tous les cas, qui se sont interdit d'avance le droit de faire leurs réserves sur l'extension du principe de Carnot à l'ensemble de l'univers. Ce sont les personnes qui n'ont aucun scrupule à énoncer, pour l'univers, le principe de la

conservation de la matière ou celui de la conservation de l'énergie. Dans la mesure où il est vrai de dire que l'énergie de l'univers se conserve, il est vrai de dire aussi que cette énergie se *dégrade*, et que l'énergie utilisable se perd. Et de même que les phénomènes dont notre petite planète ou notre système solaire est le théâtre suffisent à nous donner un exemple et une illustration du principe de la conservation de l'énergie, de même et plus nettement encore, ils nous permettent de prendre sur le fait, dans un cas particulier, la dégradation de l'énergie.

La plus grande partie de la chaleur versée par le soleil à notre planète sert tout simplement à la réchauffer, et à la préserver, pour quelque temps du moins, du refroidissement que subirait, livrée à elle-même, la terre abandonnée au rayonnement nocturne. La chute de cette chaleur, tombant de la température du soleil à la température de la terre, est une transformation naturelle qui rend possible la transformation d'une part de la chaleur solaire en énergie mécanique : les grands courants atmosphériques et marins ont leur première raison d'être dans l'échauffement des régions tropicales par rapport aux régions tempérées ou polaires ; ils sont eux-mêmes la cause de l'afflux constant d'eau sur les chaînes de montagnes : en retombant à la mer,. cette eau nous donne, sous forme de courants rapides ou de cascades susceptibles de mouvoir nos turbines et nos roues hydrauliques, la plus importante source naturelle d'énergie mécanique. La radiation solaire, en tombant sur les plantes vertes, leur permet de décomposer l'acide carbonique de l'air, pour en rejeter l'oxygène et en extraire le charbon ; elle crée ainsi dans les végétaux une réserve d'énergie chimique qu'une allumette suffit à transformer en énergie calorifique ; les gisements de charbon qui alimentent nos machines à

vapeur proviennent eux-mêmes de végétaux fossiles; et l'énergie qu'ils représentent et qui, chaque jour, s'épuise, est tout entière, elle aussi, empruntée à l'énergie des rayons solaires.

Les quelques transformations artificielles que nous observons dans ce passage de l'énergie de radiation à l'état d'énergie mécanique, ou d'énergie chimique, ou de toute autre forme *élevée* de l'énergie, ne vont jamais, ne l'oublions pas, sans une transformation naturelle incomparablement plus importante; puisqu'il y a chute de chaleur tombant du soleil sur la terre, chaleur que la terre, à son tour, rayonnera vers les espaces célestes durant la nuit. Et, dans l'ensemble, l'énergie reçue journellement par la terre sous forme de chaleur venant d'un corps à température élevée éprouve une énorme *dégradation*. Le rôle des êtres vivants : végétaux dont la chlorophylle réduit l'acide carbonique, — animaux qui transforment en mouvement une partie de l'énergie provenant des combustions intérieures à leur organisme, — êtres raisonnables, qui, consciemment, utilisent les énergies naturelles comme les chutes d'eau, à faire tourner des machines, — le rôle des êtres vivants est de ralentir dans une certaine mesure cette dégradation d'énergie qu'ils ne sauraient arrêter.

Pour nous résumer, la terre n'est pas un système isolé : elle reçoit de l'énergie, et elle en cède. Au bout de l'année, il y a à peu près équilibre entre ce qu'elle a reçu et ce qu'elle a perdu. De l'énergie venue du soleil, on peut dire qu'elle ne garde rien; elle la rend au fur et à mesure, mais elle la rend dégradée.

Le même sort est réservé à toute l'énergie rayonnée par notre soleil dans tout l'espace, et de même à l'énergie rayonnée par les étoiles. Notre système solaire, lui, perd de l'énergie, et il en perd constamment. Rien ne vient remplacer la perte sèche que

constitue la radiation solaire à travers les espaces interstellaires, et ce qu'il reçoit des autres étoiles est loin de compenser ce qu'il perd lui-même. Au total, à considérer l'ensemble des systèmes réels d'étoiles avec l'éther au milieu duquel ils voguent, il n'y a pas de déperdition, si l'on veut que le principe de la conservation de l'énergie s'applique encore ; mais à coup sûr il y a dégradation.

### § 3. — QUELQUES OBJECTIONS.

La doctrine de la dégradation de l'énergie ne s'est pas imposée sans avoir soulevé quelques objections. En indiquer dès maintenant quelques-unes, sera, croyons-nous, le meilleur moyen de préciser le sens et la portée de la doctrine elle-même. Elles seront, par la suite, examinées dans le détail.

Ne peut-il y avoir *reconcentration* de cette énorme quantité d'énergie rayonnée en tous les sens ? Les rayons envoyés par le soleil et par les étoiles, comme Sirius, ne peuvent-ils, dans les profondeurs de l'espace, se réunir quelque part comme au foyer d'un miroir ardent, et reformer là un nouveau centre de radiation ? Le physicien anglais qui a introduit dans la science l'expression d'énergie potentielle et qui peut être regardé comme le créateur de ce qu'on appelle aujourd'hui l'*Énergétique*, Macquorn Rankine, a développé avec complaisance cette hypothèse de la reconcentration de l'énergie. Il regardait comme nécessairement limité l'espace immense que remplit l'éther lumineux ; sur les limites de cet espace, il imaginait que les rayons provenant de toutes les étoiles du ciel se réfléchissaient, et, revenant sur leurs pas, allaient former de nouveaux points à température très élevée ; un soleil éteint vient-il à passer en un de

ces points, il peut y être porté à l'incandescence, et recouvrer la chaleur, la lumière et la vie.

Nous examinerons un peu plus tard cette hypothèse, qui d'ailleurs met en cause, en même temps que le principe de la dégradation de l'énergie, son extension à l'ensemble de l'univers matériel.

Peut-être, dira-t-on encore, nous sommes, pour l'instant, à une période de l'histoire du monde où il y a dégradation de l'énergie. Qui peut dire qu'il en sera toujours ainsi ? Si le monde, parti du chaos, c'est-à-dire de l'absence d'équilibre, tend vers un état d'équilibre général et universel marqué par la transformation de toutes les autres espèces d'énergie en énergie calorifique uniformément répartie, n'est-il pas loisible de supposer qu'une fois l'équilibre atteint, le monde retournera vers le chaos ? Ne pouvons-nous imaginer que le monde, « une fois transformé en un tout homogène et sans mouvement, se trouverait dans un état de complète instabilité ? »

« C'est alors que l'effort de tension qui limite l'activité universelle jouera un rôle actif en venant défaire l'œuvre accomplie par la vitesse initiale et que commencera une lente évolution en sens contraire, qui ramènera l'univers..., par une augmentation graduelle des énergies utilisables, vers l'état de chaos d'où il était sorti...

« L'éternité serait donc l'infini d'une série d'oscillations grandioses entre le chaos et l'équilibre, entre le mouvement et la chaleur, l'infini d'un rythme à longue période... »

C'est ainsi que s'exprime l'un des savants qui ont le mieux compris Carnot, et qui ont travaillé le plus à le faire comprendre : M. G. Mouret. Nous retrouverons et nous discuterons une conception analogue chez Boltzmann et chez Herbert Spencer. Bornons-

nous, pour l'instant, à reconnaître qu'il n'y a rien à répondre quand on nous déclare possible qu'il vienne un temps où le monde obéisse à d'autres lois que ses lois actuelles. Construire un monde où la chaleur se trouve être de l'énergie de qualité supérieure, et l'énergie mécanique de l'énergie de qualité inférieure, est une idée qui, en soi, n'implique pas plus de contradiction, que d'imaginer un monde où les fleuves couleraient de bas en haut. Rien pourtant ne nous permet de prédire que le monde, transformé en un tout homogène et à température uniforme, serait « dans un état de complète instabilité ». Il y a plus : tout ce que nous savons permet plutôt de prédire le contraire.

Trempons dans l'eau bouillante l'extrémité d'une cuiller d'argent, puis retirons-la et laissons-la sur une table. L'extrémité chaude se refroidit, et l'extrémité froide s'échauffe, jusqu'à ce que la cuiller entière soit toute à la même température. Quand cet état d'équilibre est atteint, il n'est pas dépassé en sens inverse. La comparaison avec une pierre qui tombe et qui rebondit serait ici complètement en défaut; et de même la comparaison avec un pendule oscillant autour de la verticale. Une fois la chaleur retombée du côté chaud au côté froid, elle n'a aucune tendance à rebondir, ni pour échauffer de nouveau la partie précédemment chaude, ni pour se porter en excès par une sorte de vitesse acquise, sur la partie précédemment froide. *La chaleur n'a aucune espèce d'élasticité.* Une fois l'équilibre atteint, aucune différenciation nouvelle ne se produit. La cuiller, supposée seule, reste en équilibre thermique stable.

Il est difficile de voir comment cet équilibre thermique serait troublé par le fait que, au lieu de la cuiller toute seule, tous les corps qui l'entourent, et tous ceux que contient l'univers, seraient arrivés, eux aussi, au même état de repos et à la même uniformité de température.

Aussi bien, ce que M. Mouret reconnaît, c'est que le monde actuel marche du déséquilibre initial, qui était le chaos, vers l'équilibre final qui sera la mort. Cela d'ailleurs, si beaucoup de gens l'ignorent, personne ne le conteste. De savoir ce qui se passera *après*, et si le monde, ayant une fois fini, recommencera, c'est, à vrai dire, une question nouvelle et qui ne nous intéresse pas au même degré. Recommencera-t-il de lui-même, livré au seul jeu des lois qui le régissent? Ce qu'il est du moins permis d'affirmer, c'est qu'il faudrait, pour qu'il en fût ainsi, que ces lois eussent changé en quelque manière et qu'elles fussent devenues, à certains égards, exactement le contraire des lois les plus générales et les plus certaines de la physique. Si l'on fait profession de regarder comme vraisemblable une hypothèse aussi gratuite, que du moins l'on ne vienne pas, dans le même temps, célébrer « l'immuable constance des lois naturelles ».

# CHAPITRE II

## Formes supérieures de l'énergie.
## Énergies mécanique, élastique, électrique.

---

### § 1. — L'ÉCHANGE ENTRE LES DEUX FORMES D'ÉNERGIE MÉCANIQUE.

Après cet exposé général qui nous donne une idée d'ensemble du principe de la dégradation, il convient de reprendre avec un peu plus de détail l'examen des diverses formes de l'énergie.

Afin de faciliter cet examen comparé, il est bon de résumer, en un tableau, les noms des diverses unités d'*énergie* employées en mécanique industrielle, en électricité et en thermodynamique. Nous y joignons les noms des unités corrélatives de *puissance*, c'est-à-dire de *vitesse de travail*, ou *d'énergie fournie en une seconde* par les machines. On remarquera que l on a créé des noms de plus grandes unités d'énergie en associant au mot *heure* le nom d'une unité de puissance : *cheval-heure*, *hectowattheure*.

| UNITÉS ADOPTÉES | UNITÉS D'ÉNERGIE — NOM | UNITÉS D'ÉNERGIE — VALEUR | UNITÉS DE PUISSANCE — NOM | UNITÉS DE PUISSANCE — VALEUR |
|---|---|---|---|---|
| EN MÉCANIQUE. | 1 kilogrammètre. (km) | Travail dépensé pour soulever un kilo à 1 mètre. | 1 cheval-vapeur (ou simplement 1 cheval). | 75 km. par seconde. |
| | 1 cheval-heure. | 3.600 × 75 = 270.000 kilogrm. | | |
| EN ÉLECTRICITÉ. | 1 joule. | Énergie d'un coulomb porté à 1 volt. Valeur : 0 km., 102. | 1 watt. | 1 joule par seconde ou : $\frac{1}{736}$ de cheval, ou encore : puissance d'un ampère sous un volt. |
| | 1 hectowattheure | 360.000 joules = 36.700 km. env. | 1 hectowatt. | 100 watts. |
| | 1 kilowattheure. | 3.600.000 joules ou 367.000 km. | 1 kilowatt. | 1.000 watts = 1 cheval,36. |
| EN THERMODYNAMIQUE. | 1 calorie. | 4 joules, 18 = 0 km . 425. | | |
| | 1 grande calorie. | 425 km. = $\frac{1}{86}$ hectowattheure. | | |

Les formes diverses de l'énergie se classent en deux grandes catégories : formes supérieures et formes inférieures. Les diverses formes d'énergie mécanique proprement dite, l'énergie élastique, l'énergie électrique, rentrent dans la première catégorie; l'énergie calorifique, l'énergie rayonnée, l'énergie mise en jeu dans les changements d'états physiques, rentrent dans la seconde catégorie. L'énergie chimique représente en général un mélange à doses complexes qui requiert une étude spéciale.

Un caractère essentiel différencie les deux groupes : *les formes supérieures ne comportent pas de degré dans leur qualité.* Elles sont, entre elles, de tout point, équivalentes. Les formes inférieures, au contraire, sont plus ou moins dégradées : elles présentent tous les intermédiaires entre une valeur égale à celle des formes supérieures et une valeur nulle. La chaleur représente de l'énergie de qualité d'autant plus relevée qu'elle est fournie par une source à plus haute température : de la chaleur rayonnée par une source à température infiniment élevée deviendrait équivalente en qualité à la même quantité d'énergie mécanique.

Les formes les plus usuelles et les plus anciennement connues d'énergie supérieure sont celles dont l'étude est l'objet de la mécanique pure, celles qui sont utilisées par des machines dont le fonctionnement ne met en jeu aucun phénomène calorifique ou électrique, — celle que nous fournissent les chutes d'eau ou la force du vent.

Il n'est peut-être pas inutile de rappeler que *travailler*, au sens mécanique du mot, c'est vaincre une résistance. Élever 10 kilogrammes à 2 mètres de haut, c'est accomplir contre la pesanteur un travail de 20 kilogrammètres. Tout le monde sent bien que le travail, qui est la mesure de l'effet utile, est pro-

portionnel à la fois au poids soulevé et au chemin parcouru : quand on paie pour faire monter des stères de bois dans un appartement, on fixe en général un prix *par stère et par étage;* pour faire transporter cinq stères au troisième étage, on paiera 15 fois ce prix.

Le kilogrammètre, unité de travail rattachée au système métrique, est d'ailleurs devenu bien petit pour la pratique industrielle d'aujourd'hui : et l'on emploie soit le cheval-heure, qui vaut 75 × 3.600 ou 270.000 kilogrammètres, soit les unités auxiliaires que l'industrie électrique a répandues : l'hectowattheure de 36.700 kilogrammètres et le kilowattheure qui vaut 10 fois plus.

Quand on a effectué une fois le travail qui a consisté à monter un poids, ce travail n'est pas perdu. On pourrait, avec le travail de 20 kilogrammètres mis en réserve, soit élever un poids égal de 10 kilogrammes à 2 mètres avec une poulie, soit faire marcher une machine-outil, une pompe, etc., dont on tirerait du travail mécanique jusqu'à concurrence de 20 kilogrammètres. On dit que ces 20 kilogrammètres mis en réserve sont de *l'énergie potentielle.* D'après cette première définition de l'énergie, — par une quantité de travail, — on voit que la grandeur appelée *énergie* est un produit de deux autres grandeurs. C'est le produit d'*une force* par *un déplacement.* Une force dont le point d'application ne se déplace pas ne produit aucun travail, ne fait pas varier l'énergie. La *force* n'est qu'un des facteurs de *l'énergie* et ne doit jamais être confondu avec l'énergie elle-même.

Au lieu de mettre en réserve cette énergie potentielle et d'en tirer tout le travail mécanique qu'elle représente, on peut la gaspiller en faisant tomber le poids de 10 kilogrammes de 2 mètres de haut; une fois tombé librement, il a perdu son énergie poten-

tielle sans avoir produit d'effet utile. Il faut toutefois remarquer que, dans la chute, la vitesse, d'abord nulle, s'accroît constamment. Au bout de 1 mètre de chute, la vitesse, déduite des lois bien connues de la chute des corps, est $4^m,40$ par seconde; la *masse* de 10 kilogrammes, en unités du système métrique, est égale au poids, divisé par l'accélération de la pesanteur : elle est $\frac{10^k}{9^m81}$ ou 1,02; ce qu'on appelle en mécanique, la *force vive* du corps, — le produit de la masse par le carré de la vitesse, — vaut ici :

$$1,02 \times (4,4)^2 = 20.$$

La *demi-force vive* est égale à 10.

Ainsi, l'énergie potentielle baissant de 20 kilogrammètres à 10, la demi-force vive s'est accrue de 0 à 10. On désigne aujourd'hui, avec Thomson et Tait, la demi-force vive sous le nom d'*énergie cinétique*, nom très bien choisi, en ce qu'il rappelle qu'il s'agit ici d'une *énergie qui tient au mouvement*.

A un moment quelconque de la chute, *la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique a une valeur constante*.

La constance de la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle constitue, en mécanique, ce qu'on appelle l'équation des forces vives; c'est un premier cas particulier du principe de *la conservation de l'énergie*.

Nous avons en effet en présence, pour la première fois, deux formes d'énergie, qui s'échangent à volonté l'une contre l'autre : et ces deux formes de l'énergie mécanique sont toutes deux des formes supérieures, équivalentes en qualité.

La constance de la somme de l'énergie mécanique potentielle et de l'énergie cinétique est subordonnée à deux conditions : la première, c'est que le corps ou l'ensemble de corps qui les possède ne *travaille* pas.

S'il accomplit à l'extérieur un certain travail, son énergie mécanique totale est diminuée d'autant. C'est ce qui se produirait pour notre poids de 10 kilos si l'on s'en servait pour en remonter un autre avec une poulie. Il descendrait alors d'un mouvement uniforme, sans autre force vive que celle de l'impulsion qui lui aurait été communiquée. Si des forces extérieures au corps travaillent sur lui, si on lui communique du travail, son énergie totale est, au contraire, augmentée.

Il en résulte cette conséquence importante que, si le corps, ou l'ensemble de corps considéré revient, au bout d'un moment, à sa position du début, s'il se retrouve exactement dans les mêmes conditions, avec la même vitesse, son énergie cinétique est redevenue la même et son énergie potentielle aussi. Il ne peut donc avoir fourni du travail à l'extérieur, à moins que, ce travail, on ne le lui ait soi-même donné. C'est le principe bien connu de l'*impossibilité du mouvement perpétuel.* Ou plutôt c'est la forme première et le cas particulier le plus manifeste de ce principe. Car la forme plus générale et plus complexe du principe réside précisément dans la loi de dégradation. Et ceux qui gardent l'espoir, plus ou moins avoué, de trouver en défaut dans quelque phénomène cette loi de dégradation sont des esprits encore accessibles, à leur insu, à l'illusion du mouvement perpétuel. Ils le sont seulement sous une forme moins rudimentaire et moins grossière que les *inventeurs* qui cherchent à réaliser la machine ayant un rendement en travail de plus de 100 °/₀.

Les systèmes mécaniques, les machines telles que les turbines, ne créent pas d'énergie : ils servent seulement à utiliser et à transformer l'énergie dont on dispose déjà. L'électricité, d'ailleurs, a un rôle tout à fait analogue : pas plus qu'une machine-outil, un appareil électrique n'est un créateur d'énergie.

A la constance de l'énergie mécanique d'un système, définie comme la somme de ses énergies potentielle et cinétique, il y a une seconde condition : c'est qu'il n'y ait pas de frottements, ni de chocs. Les frottements et les chocs, sauf le cas de chocs entre corps parfaitement élastiques, amènent une perte sèche de force vive. Quand le poids de 10 kilogrammes arrive sur le sol après une chute libre de 2 mètres, son énergie cinétique est de 20 kilogrammètres. Après le choc, si le corps ne rebondit pas, cette énergie cinétique est perdue, sans qu'il y ait gain d'énergie potentielle ni travail extérieur produit. Il y a bien alors quelque chose de perdu, et il n'est pas correct de dire que rien ne se perd. Il y a, par contre, quelque chose de gagné, qui est de la chaleur, en quantité équivalente à l'énergie cinétique disparue, à raison d'une grande calorie par 425 kilogrammètres, ou de 635 calories par cheval-heure, ou encore de 86 calories par hectowattheure.

L'équation des forces vives, dans les machines où il y a frottement, doit donc être complétée. La diminution de l'énergie totale du système, — déduction faite du travail que le système a fourni au dehors, — représente l'équivalent de la chaleur produite. Si l'on considère ce système revenu, après une série d'opérations, à son état initial, — ayant décrit ce qu'on appelle un *cycle* fermé, — l'énergie totale a repris à la fin la même valeur qu'au début. Il y a encore *conservation de l'énergie*, à la condition d'évaluer chaleur et travail à l'aide des mêmes unités. Et dans un système isolé, on aura :

Diminution de l'énergie mécanique totale (potentielle + cinétique) = chaleur produite dans le système.

Mais avec cette forme, — généralisée par rapport à la simple équation des forces vives, — de la conservation de l'énergie, nous voyons apparaître la confusion déjà signalée, et sur laquelle il faudra revenir encore.

### § 2. — ÉNERGIE UTILISABLE ET ÉNERGIE LIBRE.

L'énergie mécanique était tout entière bonne, sous l'une ou l'autre de ses deux formes, cinétique ou potentielle. Dans le cas où l'on n'a affaire qu'à de l'énergie purement mécanique, on peut identifier les notions d'*énergie* et de *puissance motrice*. Dès qu'apparaît de la chaleur développée par frottements, il y a bien *conservation de quelque chose*, à condition de compter la chaleur en unités d'énergie. Mais, manifestement, il n'y a plus *conservation de la puissance motrice* : il y a, dans toutes nos machines, destruction d'une fraction plus ou moins réduite de celle-ci, fraction réduite à moins de 25 °/₀ et même à moins de 20 °/₀ avec les turbines d'aujourd'hui, mais enfin fraction qu'on ne réduit pas à zéro, à plus forte raison qu'on ne change pas de signe.

La *puissance motrice* pourrait donc être définie par l'énergie mécanique disponible, ou par l'énergie susceptible d'être transformée en énergie mécanique. Elle s'identifie avec ce que nous avons désigné sous le nom d'énergie de qualité supérieure, dans le cas où de telles formes d'énergie existent : et elle correspond à la fraction des énergies de qualité inférieure qui peut être convertie en énergie mécanique supérieure, dans le cas où l'emprunt d'énergie supérieure doit être fait à des sources d'énergie inférieure. Pour éviter de créer quelque confusion, par l'emploi répété de ce mot de *puissance motrice*, avec la quantité appelée aujourd'hui *puissance* d'une machine, — c'est-à-dire énergie dépensée en une seconde, ou vitesse de production du travail, — nous substituerons désormais à la dénomination, pourtant expressive, de puissance motrice, l'expression plus conforme au langage courant, *d'énergie utilisable*.

Helmholtz a introduit dans la science — et notamment dans la physicochimie, — le nom d'*énergie libre*, « freie Energie », pour désigner la part d'*énergie supérieure* qui peut se trouver, mélangée à d'autres, dans une réserve multiforme d'énergie. L'énergie libre est, cela va de soi, de l'énergie utilisable. Mais on pourrait préciser le sens des deux expressions, de manière à faire de l'énergie utilisable quelque chose de plus que l'énergie libre. On pourrait, par exemple, réserver le nom d'*énergie libre* à l'énergie de qualité supérieure, directement transformable en travail mécanique, que possède un système matériel. L'énergie électrique, sous la forme usuelle, est de l'énergie libre. L'énergie des combinaisons chimiques est, en général, au moins partiellement, de l'énergie libre. Outre son énergie libre, un système possède des énergies inférieures d'où l'on peut extraire du travail ; c'est le cas si c'est un milieu où règnent des différences de température. On pourrait reprendre le nom de *motivité thermodynamique* employé par Thomson, et l'appliquer à la quantité maximum d'énergie mécanique qu'il est possible, dans les circonstances les plus favorables, de tirer des énergies de qualité inférieure du système. Ces deux définitions étant admises, *l'énergie utilisable* du système, ou sa « puissance motrice », serait la somme de son *énergie libre* et de sa *motivité thermodynamique.*

La machine à vapeur est l'exemple classique de l'extraction d'énergie supérieure d'une source d'énergie de forme inférieure. Et la découverte de la machine à vapeur a été pour l'industrie une révolution. On brûlait bien du charbon depuis la plus haute antiquité ; les mines de charbon étaient connues, si l'on veut, comme réservoirs d'énergie calorifique. Mais jusqu'à Papin, on ne savait pas régulièrement transformer de l'énergie calorifique en énergie mécanique, et l'on

peut dire en ce sens qu'en découvrant la machine à vapeur, on a découvert une source naturelle, jusqu'alors ignorée, d'énergie mécanique.

## § 3. — ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

L'électricité industrielle ne constitue rien de pareil. Elle n'a pas apporté une source nouvelle d'énergie mécanique. Pour faire marcher une machine électrique qui donne du travail et de la chaleur, il faut dépenser de l'énergie prise à l'une des sources déjà connues : il faut produire du travail, ou bien brûler du charbon ou du zinc.

Seulement l'électricité nous offre une source d'énergie qui se prête avec une admirable souplesse au transport et à la transformation, et qui offre, par-dessus tout, *le précieux avantage de fournir de l'énergie de forme supérieure, directement équivalente à de l'énergie mécanique.*

Disposer entre deux bornes d'une distribution électrique d'un voltage donné, et, entre ces points, d'un appareil électrique susceptible de supporter un courant donné, c'est disposer d'une puissance égale au produit du voltage par le courant. Avec une distribution à 110 volts et un appareil, machine ou lampes, prenant 5 ampères, on a 550 watts, utilisables immédiatement sous la forme d'énergie que l'on veut. La dynamo fonctionnant comme moteur convertit aisément, sans déchet notable, l'énergie électrique en énergie mécanique : la réversibilité de la dynamo, qui est une de ses propriétés les plus précieuses, — j'entends la réversibilité dans des conditions vraiment pratiques d'excellent rendement dans les deux sens, — résulte de l'équivalence de qualité des énergies mécanique et électrique.

De l'énergie électrique, comme de l'énergie méca-

nique, une petite fraction passe toujours à l'état de déchet, et ne se retrouve plus que sous forme de chaleur : c'est la chaleur dégagée dans la résistance des fils conducteurs qui transportent le courant. Par contre, l'électricité offre l'avantage de permettre la localisation précise de cette dégradation, et l'apport de chaleur au point voulu, d'où elle sera utilisée sur place ou rayonnée au loin.

On rappelle ici que l'unité d'énergie employée en électricité est le *joule*. C'est le travail qu'effectue un *coulomb*, tombant de un *volt*. Le joule vaut à peu près un dixième de kilogrammètre, exactement $0^{km},102$. L'unité de *puissance* est le *watt* qui vaut un joule par seconde et qui est la puissance dépensée dans un appareil parcouru par un courant d'un ampère, ayant entre ses bornes une tension d'un volt. Le watt a servi à son tour à former les noms des unités auxiliaires d'énergie : hectowattheure et kilowattheure.

Le coulomb lui-même est la quantité d'électricité qui, en traversant un bain d'argenture, dépose 1 milligramme,118 d'argent ; l'ampère, qui est l'unité de courant, est le courant qui, par seconde, transporte un coulomb, ou qui, passant dans un bain d'argenture, y dépose 1 milligramme,118 d'argent en une seconde. Un coulomb est la même chose qu'un ampère-seconde ; et un ampère-heure vaut 3.600 coulombs.

Pour se faire une idée concrète du *volt*, il suffit de se rappeler que les distributions électriques des appartements ont en général une force électromotrice de 110 volts. Si le voltage tombe au-dessous, les lampes électriques usuelles cessent de briller et d'éclairer. Au-dessus, elles sont éblouissantes, mais éphémères.

Quand il a passé un coulomb dans le filament d'une lampe usuelle de 16 bougies et 110 volts, — ce qui demande environ deux secondes, — c'est qu'il a été dépensé $1 \times 110 = 110$ joules d'énergie électrique.

Une pile d'un volt pourrait être définie : une pile qui, moyennant une dépense d'énergie d'un joule, donne un coulomb d'électricité. Un accumulateur a une force électromotrice toujours voisine de deux volts : c'est dire que pour lui donner une charge d'un coulomb, il faut dépenser deux joules ; et une charge de 3.600 coulombs ou d'un ampère-heure, il faut dépenser deux fois 3.600 joules, soit deux wattheures ou un cinquantième d'hectowattheure.

## § 4. — ÉNERGIE ÉLASTIQUE.

L'énergie potentielle due à la pesanteur, ou énergie potentielle gravifique, est la plus usuelle, mais non la seule, des formes d'énergie mécanique contenues en puissance dans un ensemble matériel.

Rien ne ressemble plus aux oscillations d'un pendule que les vibrations d'une branche de diapason. Quand on change légèrement la forme d'un corps solide rigide, il a tendance à reprendre sa forme première. Laissé libre, il la reprend en effet ; et, revenu à la forme d'équilibre, la dépasse pour subir une déformation inverse. Les oscillations successives diminuent progressivement d'amplitude ; elles s'amortissent plus ou moins vite. Mais elles peuvent être très nombreuses. Un diapason vibrant peut faire jusqu'à cent mille vibrations sans être « remonté ».

Si le solide déformé est maintenu déformé par un taquet ou un cran d'arrêt, la tendance à la reprise de la forme primitive n'est plus suivie d'effet immédiat : il reste une possibilité de mouvement, un travail en réserve disponible : c'est de l'énergie potentielle élastique.

Cette énergie élastique augmente avec la déformation. Exactement, elle augmente comme le carré de la déformation. Si la déformation est doublée, la

force déformatrice est doublée également : leur produit est quadruplé.

L'énergie potentielle élastique est employée aux mêmes besognes que l'énergie potentielle gravifique. Dans une horloge à poids, c'est la chute progressive des poids qui fait tourner, toujours dans le même sens, la roue d'échappement et la force à maintenir les oscillations du pendule. Dans une pendule d'appartement ou une montre, c'est un ressort tendu qui joue le rôle des poids de l'horloge. Remonter l'horloge, c'est, au sens propre du mot, remonter les poids descendus; remonter la montre, c'est, par extension et au figuré, rendre au ressort spiral sa tension et, par suite, son énergie potentielle.

Quand horloge ou montre s'est arrêtée, elle ne se trouve pas, pour cela, « dans un état de complète instabilité ». L'énergie potentielle s'est peu à peu dissipée. Elle reste dissipée. Si un grand nombre d'horloges arrêtées se trouvent côte à côte, elles ne se remontent pas les unes les autres. Chaque système isolé, possédant une dose limitée d'énergie potentielle, finit par s'arrêter. Il est étrange qu'on ait pu se représenter un monde matériel, formé d'un ensemble de pareils systèmes, comme capable de perdre de son énergie de ressort dans chacun de ses systèmes constituants, mais, au total, de « se rattraper sur l'ensemble ».

Un corps élastique d'une espèce très particulière est le corps gazeux. Comprimé, de l'air se détend. Détendu à une pression moindre que la pression ordinaire, il se comprime dès qu'il est libre. C'est l'action de l'air comprimé, ou, d'une façon plus générale, des gaz comprimés, sur un piston mobile à l'intérieur d'un cylindre, qui est à la base du fonctionnement de toute machine à feu. Si on établit entre les deux compartiments d'une boîte séparée en deux par un

piston, une différence de pression, le gaz le plus comprimé chasse le piston vers l'autre. La tige du piston, par une manivelle et une bielle, peut actionner une roue, et produire du travail. Or, la différence de pression peut résulter d'une différence de température. De là, la possibilité de produire du travail par une dépense de combustible.

Les alternatives de compression et de détente d'un gaz peuvent donner lieu à des vibrations musicales, tout comme les alternatives de mouvement, à droite et à gauche, des branches d'un diapason. Dans les instruments à vent, c'est l'air vibrant à l'intérieur d'un tuyau d'orgue qui produit le son. L'élasticité de l'air du tuyau joue le même rôle que l'élasticité de la corde du violon.

Mais il existe entre l'énergie d'un ressort tendu et l'énergie d'une masse d'air comprimé, une différence fondamentale, qui donne à l'étude de l'air comprimé une importance exceptionnelle en thermodynamique. D'un mot, elle peut être formulée ainsi : tandis qu'en remontant une montre, on donne à son ressort une dose d'énergie supplémentaire, quand on a comprimé de l'air dans un réservoir maintenu à la température de l'extérieur, on n'a pas augmenté l'énergie de cet air. On a augmenté seulement son énergie utilisable. On peut, avec un gaz comprimé, ce qu'on ne saurait pas faire avec un solide : *augmenter l'énergie utile sans augmenter l'énergie totale*. Aux gens habitués à sous-entendre « l'énergie utilisable » quand ils parlent, ou qu'on leur parle, d'« énergie », cela paraît non seulement un tour de force, mais un non-sens. Il n'est pas surprenant qu'ils ne puissent rien comprendre à la production du froid.

C'est là un point auquel il ne sera pas superflu de consacrer une étude spéciale.

### § 5. — ÉNERGIE DU MOUVEMENT OSCILLATOIRE EN GÉNÉRAL.

Quand un pendule oscille autour de la verticale, on peut dire qu'il conserve l'énergie initiale qu'on lui avait communiquée, jusqu'à ce qu'elle ait été tout entière dissipée par frottements : l'oscillation s'amortit progressivement. Si l'amortissement pouvait être nul, l'oscillation se reproduirait identique à elle-même un nombre indéfini de fois.

Quand le point pesant est au plus bas de sa course, il n'a pas d'énergie potentielle ; la vitesse est. à cet instant, la plus grande possible, et l'énergie cinétique est maximum. Quand, au contraire, le pendule est au haut de sa course, et qu'il rebrousse chemin, sa vitesse devient nulle et avec elle son énergie cinétique : l'énergie potentielle devient au contraire maximum. Entre ces deux formes d'énergie, il y a échange périodique de valeurs : leur somme est constante, la valeur moyenne est la même pour les deux.

Les oscillations majestueuses de la lampe suspendue à la voûte de la cathédrale de Pise, et qui fixèrent l'attention distraite de Galilée, fournissaient un exemple significatif d'oscillation d'une dose déterminée d'énergie entre les deux formes cinétique et potentielle.

Il en serait tout à fait de même s'il s'agissait, non d'un petit mouvement oscillatoire, mais d'une révolution d'un satellite autour d'un astre central, se faisant sur une trajectoire elliptique ou circulaire. Dans le cas de la trajectoire circulaire, l'énergie cinétique est constante, l'énergie potentielle aussi ; et elles sont constamment égales entre elles. Dans le cas d'une trajectoire elliptique, le maximum de l'une coïncide avec le minimum de l'autre.

Dans la conception moderne des phénomènes de radiation à l'intérieur des atomes, c'est la révolution

de corpuscules d'électricité négative autour d'un noyau central chargé d'électricité positive qui est le phénomène essentiel.

Nous sommes donc en présence d'un phénomène tout à fait général dans la nature : le *mouvement harmonique*, que ce soit celui d'une planète autour du soleil, d'un corps matériel quelconque effectuant des oscillations de part et d'autre de sa position d'équilibre, d'un fragment d'atome autour de son noyau ; ces mouvements obéissent aux mêmes lois. Un observateur, même superficiel, n'aurait pas de peine à identifier le mouvement circulaire régulier et le mouvement pendulaire, car celui-ci n'est que le mouvement d'un mobile parcourant avec une vitesse constante un cercle que l'on regarde par la tranche.

L'énergie de translation de la terre sur son orbite est hors de notre portée : nous ne pouvons y faire des emprunts pour actionner nos machines. Il nous faut des énergies d'oscillations plus à notre portée : déjà la rotation quotidienne de la terre provoque quelques mouvements oscillatoires utilisables, tels que les marées ; par des dispositifs convenables de réservoirs et de vannes, on peut faire marcher des *moulins de marée ;* on pourrait actionner des dynamos. C'est une nouvelle façon d'accrocher les roues de notre industrie à la grande roue de la nature.

Avec des oscillations pendulaires moins grandioses, mettant simplement en jeu des masses comme les marteaux-pilons de nos grandes usines métallurgiques, on pourrait fabriquer aisément de l'énergie électrique.

Des vibrations de diapason sont déjà plus malaisées à « capter ». En temps ordinaire, leur énergie se disperse dans l'espace par rayonnement. Pour maintenir les vibrations en état d'amplitude constante, il faut les « entretenir », c'est-à-dire, avec une source d'énergie, telle qu'une pile, leur restituer à chaque

instant l'énergie communiquée à l'air qui propage la vibration. Que l'on veuille recueillir intégralement l'énergie que possède un diapason vibrant, et la mettre en réserve sans déchet appréciable, ce sera malaisé, sans être impossible. On pourra par exemple arrêter progressivement le diapason par un freinage électrique, provoquant des courants d'induction qui gênent le mouvement ; et l'on conçoit très bien qu'à l'aide d'une commutatrice ou d'une soupape redresseur de courant, on se serve de ces courants pour augmenter la charge d'un accumulateur.

Mais descendons d'un degré dans l'échelle de ces mouvements oscillatoires. Supposons que des masses égales à celles des molécules des gaz normaux oscillent avec des vitesses de 500 mètres à la seconde, et décrivent ainsi de petites droites, des cercles ou des ellipses, ayant comme plus grande dimension un dix-millième de millimètre.

L'énergie que chacune de ces masses possède à un instant donné de son mouvement est bien de l'énergie cinétique. Mais comment la saisirons-nous ? Et si nous avons, en une petite portion d'espace, des millions et des milliards de ces petites masses animées de tels mouvements oscillatoires, deviendra-t-il possible de les arrêter pour mettre en réserve l'énergie qu'elles renferment ?

Question grave et délicate entre toutes. Car s'il est possible de retransformer en énergie mécanique vraiment utilisable toute l'énergie cinétique de mouvements semblables aux mouvements moléculaires, comment se fait-il que la chaleur, qui semble bien consister en de tels mouvements, ne soit pas intégralement transformable en énergie mécanique ? Admettons au contraire qu'il n'est pas possible de tirer de l'énergie de réserve de mouvements vibratoires purement mécaniques, uniquement parce qu'ils sont d'amplitudes extrêmement petites : n'est-ce pas admettre

qu'il ne suffit pas d'indiquer la nature d'une forme d'énergie pour en déduire sa qualité, mais qu'il faut dire encore à quelle échelle se passe le phénomène? N'est-ce pas réduire la division en formes supérieures et formes inférieures à une simple division commode pour l'homme, mais sans portée objective? Ou bien encore le véritable élément objectif de distinction entre une énergie de mouvements d'agitation moléculaire, et une énergie directement utilisable, ne serait-il pas que, dans le mouvement moléculaire, il y a des vitesses dirigées en tous sens, sans ordre, il y a mouvements non-coordonnés, — « ungeordnete, » disent les auteurs allemands, — et que la transformation en mouvements pouvant donner de l'énergie supérieure consisterait à introduire entre ces mouvements une coordination? Ainsi l'*ordre* dans l'univers matériel serait la marque de l'utilité, et la mesure de la valeur; et cet ordre, loin d'être spontané, tendrait constamment à se détruire.

Le *désordre* vers lequel marche une collection de molécules, n'est nullement, d'ailleurs, le *chaos* initial, riche de différences et d'inégalités génératrices d'énergies utiles : c'est, au contraire, l'égalité et l'homogénéité moyennes dans le défaut absolu de coordination.

## CHAPITRE III

## Une forme supérieure d'énergie : l'énergie chimique libre.

---

### § 1. — ÉCHANGE ENTRE LES ÉNERGIES ÉLECTRIQUE ET CHIMIQUE PAR L'ACCUMULATEUR.

L'énergie électrique est équivalente en qualité à l'énergie mécanique.

La turbine et la dynamo sont toutes deux réversibles : accouplées, elles permettent, en dépensant l'énergie mécanique de l'eau sous pression, de produire de l'électricité ; ou, en dépensant au contraire de l'énergie électrique, de remonter de l'eau et de recréer de l'énergie mécanique. Le troc entre les deux énergies est également aisé dans les deux sens.

Cette définition pratique de *l'équivalence de qualité* nous permettra d'aborder un problème longtemps discuté, et parfois maladroitement posé : celui de la *qualité* de l'énergie chimique.

La dynamo et la batterie d'accumulateurs sont, comme la dynamo et la turbine, deux appareils qu'on peut directement accoupler et faire marcher dans les deux sens. Avec la dynamo, on peut d'abord charger les accumulateurs : le courant opère certaines décompositions chimiques, il produit dans les bacs la réaction contraire à celle qui serait spontanée. On peut

ensuite décharger les accumulateurs dans la dynamo et la faire fonctionner comme moteur : l'énergie chimique récupérée dans la charge se dépense dans la décharge, et restitue à son tour l'énergie électrique qu'on avait dépensée pour la charge.

La restitution est-elle intégrale ? Pas absolument, mais peu s'en faut. On retrouve à la décharge jusqu'à 80 et 90 °/₀ de l'énergie électrique dépensée à la charge. Et, dans des conditions spéciales de charge et de décharge, rien n'empêche d'améliorer ces rendements et de s'approcher de cent pour cent.

Il y a donc équivalence de qualité entre l'énergie électrique de la dynamo et l'énergie chimique de la batterie d'accumulateurs. Les modifications chimiques intervenues dans les plaques qui plongent dans les bacs représentent une augmentation d'énergie directement transformable en énergie électrique, et que l'on évaluera pratiquement en kilowattheures. Ces modifications représentent donc de l'énergie chimique de même qualité que l'énergie électrique, c'est-à-dire de qualité supérieure.

C'est de l'énergie chimique *libre*.

## § 2. — FORCE ÉLECTROMOTRICE ET CHALEUR CHIMIQUE.

L'énergie chimique est une forme d'énergie potentielle. Une charge de poudre représente de l'énergie de réserve, qu'un choc permettra d'actualiser. Cette énergie potentielle est-elle toujours de l'énergie de qualité supérieure, de l'énergie libre ?

Dans la réalité, l'énergie potentielle chimique d'un explosif ou d'un corps susceptible de se combiner à d'autres, comprend deux parts : une part d'énergie libre et une part d'énergie inférieure, équivalente en qualité à l'énergie calorifique : c'est cette dernière que Helmholtz appelle énergie liée ou dépendante

(*gebundene Energie*). La distinction entre ces deux parts de l'énergie chimique est parfois malaisée : du moins est-elle immédiate pour toute une catégorie de réactions, celles qui peuvent être utilisées dans la pile à la production du courant électrique.

*La part d'énergie chimique immédiatement transformable en énergie électrique est, d'après la définition même, de l'énergie libre.*

Si une batterie d'accumulateurs chargée peut fournir 10 kilowattheures, c'est que l'énergie chimique *libre* que possèdent les plaques actives, après la charge, est de 10 kilowattheures.

Pour définir et mesurer l'*énergie chimique totale* d'une réaction, on peut la recueillir sous forme de chaleur; on s'arrange pour que la réaction chimique ne donne ni travail ni électricité : en ce cas, elle ne donne que de la chaleur, l'énergie chimique se dégrade, et nous examinerons quelles sont les lois de cette dégradation. Douze grammes de charbon, en brûlant dans l'oxygène pour donner de l'acide carbonique, dégagent 95.000 calories. On peut dire que *l'énergie chimique* de cette réaction est de 95.000 calories, ou encore de 400.000 joules.

Les tables de calorimétrie chimique donnent en général les quantités de chaleur dégagées dans les réactions, rapportées à des *poids équivalents* de matières. Un gramme d'hydrogène peut se substituer à 108 grammes d'argent, à 31$^{gr}$,8 de cuivre ou à 32$^{gr}$,7 de zinc. Ce sont les poids que déposerait dans un bain d'électrolyse une même quantité d'électricité : 96.500 coulombs. C'est à ces poids équivalents des divers métaux que l'on rapporte les énergies. On dira, par exemple que 32 gr., 7 de zinc, attaqués par l'acide sulfurique pour donner du sulfate de zinc, dégagent 53.500 calories; que 31 gr., 8 de cuivre, en donnant de même du sulfate de cuivre, dégagent 28.200 calories. Si le zinc déplace le cuivre de son sulfate, ce qui est

en définitive la réaction de la pile Daniell, il se dégagera, par équivalent de ces métaux, la différence, soit 25.300 calories.

Si on rapportait ces énergies à 1 coulomb, on arriverait à des nombres de calories 96.500 fois plus petits; et si on voulait évaluer l'énergie en unités d'énergie électrique, c'est-à-dire en joules, on aurait des nombres 4,18 fois plus grands. Au total, pour passer du nombre qui donne, dans les tables, *l'énergie chimique d'une réaction en petites calories par équivalent*, au nombre qui donne *en joules* la même *énergie chimique rapportée à la quantité de matière qui correspond à un coulomb*, il faut diviser le nombre de petites calories par $\frac{96.500}{4,18}$ ou par 23.100.

Pour exprimer en joules par coulomb l'énergie mise en jeu dans la réaction chimique dont une pile est le siège, il suffit de diviser par 23.100 le nombre de calories par équivalent. On arrive ainsi à 1,09 joule par coulomb pour la pile Daniell, c'est-à-dire — d'après la définition donnée au chap. II, § 3, p. 47, — à 1 volt,09, pour la force électromotrice de la pile Daniell.

Si la force électromotrice a bien réellement cette valeur, c'est que, — ainsi que c'est le cas pour l'élément Daniell ordinaire formé d'une solution de sulfate de zinc où plonge une plaque de zinc, et qu'un vase poreux sépare d'une solution de sulfate de cuivre où plonge une plaque de cuivre, — toute l'énergie chimique, habituellement dégradée en chaleur, peut être « captée » et transformée en énergie électrique. C'est que l'énergie chimique est intégralement libre.

Mais s'il arrive que la force électromotrice de la pile réalisée n'atteigne pas la valeur calculée, c'est qu'une part de l'énergie chimique est incapable de transformation directe. C'est ce qui se produit pour la pile à sulfates de cuivre et de fer, obtenue par simple substitution du fer au zinc dans le Daniell. L'énergie

chimique est de 19.100 calories, et la force électromotrice n'est que de 0 volt, 63, ce qui, multiplié par 23.100, donnerait seulement 14.600 calories. En d'autres termes, sur 19.100 calories d'énergie, il n'y en a que 14.600 qui soient de l'énergie libre. Le reste, 4.500 calories, est de l'énergie liée.

Le cas inverse se produit : si, dans la pile Daniell, on remplace la solution de sulfate de zinc par une de potasse, on forme une pile dont la chaleur chimique est de 30.200 calories, et la force électromotrice supérieure à ce qu'elle devrait : elle est de 1v,4, ce qui, multiplié par 23.100, donnerait 32.300 calories ; nous avons ici 32.300 calories d'énergie libre avec 30.200 calories d'énergie : l'énergie libre, l'énergie utile, surpasse l'énergie. L'énergie liée est négative. Pour employer le langage du physicien français Raoult qui, le premier, appela l'attention sur cette catégorie de piles, la *chaleur voltaïque* surpasse alors la *chaleur chimique*.

Ces dénominations de chaleur chimique et de chaleur voltaïque sont expressives. Qu'on place un élément de pile ou un accumulateur dans un calorimètre et qu'à circuit ouvert, ait lieu la réaction chimique : elle dégage des calories, qu'on peut mesurer : c'est la *chaleur chimique*. Qu'on réunisse, dans une seconde expérience, les pôles de l'élément par un fil conducteur long et fin, où circulera le courant produit : si le circuit entier reste dans le même vase calorimétrique, on obtiendra le même nombre de calories pour le même poids de matières réagissantes. Mais qu'on transporte ce fil conducteur, long et fin, dans un second vase calorimétrique : dans celui-ci sera localisée la chaleur résultant de la transformation de l'énergie électrique. Si le fil est assez résistant pour représenter pratiquement toute la résistance électrique du circuit, il sera le siège d'un dégagement de chaleur équivalent à toute l'énergie électrique qu'on peut tirer de la réaction chimique accomplie

dans la pile : c'est, par définition, la *chaleur voltaïque*. C'est cette chaleur voltaïque, évaluée en petites calories, et rapportée à un débit total d'électricité de 96.500 coulombs, qui, divisée par 23.100, donne toujours la force électromotrice de la pile en volts. Elle peut être égale à la chaleur chimique : c'est le cas de la pile Daniell, et à peu près de l'accumulateur ordinaire au plomb ; alors, la pile étant dans un calorimètre et le fil résistant dans un autre, toute la chaleur se dégage dans celui des calorimètres où est le fil, et rien dans celui qui contient la pile : l'énergie chimique tout entière est extériorisée, et ne se dégage sous forme de chaleur que là où le fil fin la localise. La chaleur voltaïque peut être inférieure à la chaleur chimique : c'est le cas de la pile Daniell au fer ; alors toute l'énergie chimique ne saurait être extériorisée, une partie apparaît toujours comme chaleur dans la pile même. La chaleur voltaïque enfin, peut dépasser la chaleur chimique. En ce cas, il se dégage plus de chaleur dans le fil fin, séparé, que dans ce fil et l'élément de pile réunis ; c'est-à-dire que, dans l'élément de pile seul, apparaît du froid : la pile se refroidit en envoyant de l'énergie ailleurs. *Toutes ces expériences calorimétriques ont été faites.* Le dégagement de chaleur ou de froid dans la pile seule, quand toute la chaleur voltaïque est recueillie ailleurs, est généralement faible ; mais il n'est pas nécessairement nul.

Il s'en faut donc que l'énergie chimique soit quelque chose d'aussi simple, et d'aussi aisé à cataloguer dans les formes d'énergie, que l'énergie mécanique ou élastique. Et, cependant, nous voyons qu'en général la grosse part de l'énergie chimique dégagée dans une réaction est de l'énergie équivalente en qualité à l'énergie électrique. L'énergie chimique des combinaisons spontanées et actives est, en gros, de l'énergie libre. Nous verrons sous quelles formes imparfaite-

ment correctes a été parfois énoncée cette idée-là.

Une remarque incidente est que nous saisissons ici un exemple où l'*énergie libre* d'un système matériel peut dépasser son *énergie*, et où ce paradoxe devient possible : que le système fournisse plus d'énergie utile qu'il n'a d'énergie. Plus complètement encore, l'air comprimé satisfait à cette condition paradoxale.

## CHAPITRE IV

# L'énergie de l'air comprimé et le froid artificiel.

---

### § I. — « ÉNERGIE UTILISABLE » ET « ÉNERGIE » DE L'AIR COMPRIMÉ.

« Le cas de l'air comprimé, dit Tait, est très instructif et en même temps très simple. Il a été complètement étudié par Joule, et de la manière suivante. Il prit un vase solide contenant de l'air comprimé et le mit en communication avec un autre vase dans lequel l'air avait été raréfié. Les deux vases étaient plongés chacun dans un réservoir rempli d'eau. Après avoir soigneusement agité l'eau du réservoir, de manière à rendre sa température uniforme, on ouvrit brusquement un robinet dans le tube de communication des deux vases. L'air comprimé se précipita violemment dans le vase vide, et ce passage de l'air d'un vase à l'autre se continua jusqu'au moment où la pression fut la même dans les deux vases. Comme on pouvait s'y attendre, l'opération eut pour résultat un abaissement de température du vase d'où l'air était sorti avec violence. Il avait dépensé une partie de son énergie en forçant l'air à passer dans l'autre vase. Mais l'air, en pénétrant dans

ce dernier, venait se heurter contre les parois, et l'énergie avec laquelle il avait traversé le conduit était retransformée en chaleur. De cette manière, l'air arrivé dans le vide s'était échauffé, tandis que celui qui était resté dans l'autre vase s'était refroidi. En agitant l'eau autour de ces vases, après le passage de l'air du premier vase dans le second, et en fermant le robinet, Joule trouva que le nombre d'unités de chaleur perdues d'un côté par le vase et l'eau étaient presque exactement égal à la quantité de chaleur gagnée de l'autre côté.

« Il répéta ensuite l'expérience, en mettant les deux vases dans un même réservoir rempli d'eau au lieu de mettre chaque vase dans un réservoir séparé. En faisant passer une partie de l'air d'un vase à l'autre, et en remuant l'eau jusqu'à ce qu'elle ait pris partout la même température, il trouva qu'il y avait à peine une variation de température sensible. Ces expériences prouvent d'une manière incontestable que la quantité de chaleur perdue par une partie de l'air est égale à la quantité de chaleur gagnée par l'autre partie, au moins autant qu'une expérience de ce genre permet d'en juger. Or, ce fait vous montre que l'air comprimé possédait une certaine capacité de produire du travail.

« Vous auriez pu vous en servir pour mettre en mouvement une machine à air comprimé, ou bien pour chasser les boulets d'un canon à air, ou pour une autre opération de ce genre. Mais dans l'état final, lorsque l'air s'était dilaté de manière à occuper le double de son volume primitif, il n'avait plus rien de cette puissance motrice utilisable. Il y a donc eu une dissipation de l'énergie, ou d'une partie de l'énergie que l'air possédait primitivement; et cependant, comme vous avez vu, l'appareil et son contenu n'avaient point perdu de chaleur.

« En somme, il n'y a eu aucune perte de chaleur,

car l'un des vases avait gagné ce que l'autre avait perdu. Aucune chaleur n'a été cédée aux corps extérieurs et aucun travail utile n'a été produit. On a simplement laissé l'air se dilater, changer de volume, sans mettre en marche aucun piston, sans faire exécuter aucun travail à des corps extérieurs. Par conséquent, *il possède finalement la même quantité d'énergie qu'au début; mais il ne possède plus la même quantité d'énergie utilisable*. L'air avait saisi l'occasion qui s'est présentée pour dissiper une partie de son énergie, et il l'a dissipée, autant que cela était possible dans les conditions du dispositif.

« Voici maintenant le point réellement curieux dans cette question. Pour restituer la valeur perdue à l'énergie de l'air, pour replacer cet air dans les conditions primitives de manière à le rendre capable de produire la même quantité de travail qu'auparavant, il serait nécessaire de dépenser du travail. Il faudrait, en effet, le transvaser à l'aide d'une pompe du vase double dans le vase simple; mais la quantité de chaleur ainsi dépensée à pomper l'air a pour effet d'échauffer toute la masse d'air. Quand on a dépensé assez de travail pour forcer l'air à passer du second vase dans le premier, on trouve que la quantité de chaleur dégagée pendant l'opération, qui peut être mesurée avec beaucoup de précision, est presque exactement équivalente au travail dépensé pour forcer l'air à revenir à son état initial.

« Donc, pour restituer à l'énergie sa valeur primitive, *vous n'avez pas besoin de dépenser de l'énergie : vous n'avez besoin que de faire subir une dégradation à une certaine portion d'énergie*. Vous avez dépensé du travail, et en échange vous avez obtenu l'équivalent de la dépense en chaleur moins utile. Pour restituer sa valeur à l'énergie que la masse d'air possédait primitivement et qu'elle a perdue par sa dilatation graduelle, vous êtes obligés de perdre une certaine

quantité d'énergie, ou mieux, de l'échanger contre une mauvaise forme d'énergie[1]. »

Un réservoir d'air comprimé de 2 litres de capacité rempli d'air à 10 atmosphères et un réservoir de 10 litres plein d'air à 2 atmosphères, contiennent *à peu près* la même masse d'air et la même quantité totale d'énergie. Je dis : *à peu près.* Ce serait *exactement*, si l'air était rigoureusement un *gaz parfait*, suivant la loi de compression de Mariotte et la loi de dilatation de Gay-Lussac. En réalité, l'écart à ces lois simples est d'autant plus notable que la différence de pression est plus forte. On peut négliger cet écart dans une première approximation.

L'*énergie* est la même pour une masse de 2 litres d'un gaz parfait à 10 atmosphères et pour une masse de 10 litres du même gaz à 2 atmosphères, puisque, comme l'a vu Joule, la détente des 2 litres à 10 atmosphères dans un vase vide de 10 litres se fait sans aucun travail extérieur et sans gain ni perte de chaleur; il y aurait pour l'air, en réalité, léger refroidissement. Mais si on le néglige comme on a négligé l'écart à la loi de Mariotte, on peut dire que *l'énergie de la même masse totale d'air ne dépend pas du volume qu'elle occupe* ou de la pression qu'elle exerce.

Et pourtant il est bien évident que *l'énergie utilisable*, ou la capacité de produire du travail extérieur, est plus grande si l'air est comprimé que s'il ne l'est pas. Cette énergie utilisable, si la température ne varie pas, croît en progression arithmétique si la pression croît en progression géométrique. Elle augmente par échelons égaux, si l'on comprime d'abord de 2 à 10 atmosphères, puis de 10 à 50, puis de 50 à 250 atmosphères, — et inversement baisse de quantités identiques, si l'on détend l'air de 250 à

1. P.-G. Tait. — Conférences sur quelques-uns des progrès récents de la physique. — Trad. Krouchkoll, Paris, Gauthier-Villars, 1887, p. 183-186.

50, de 50 à 10 ou de 10 à 2 atmosphères, en produisant une détente lente qui permette à l'air détendu de se maintenir constamment à la température du milieu extérieur.

Dans cette détente isothermique, ou à température constante, l'air comprimé fournit du travail. Ce travail est accompli aux dépens de l'énergie utilisable de l'air comprimé, à laquelle il peut servir de définition et de mesure. Mais on ne peut pas dire qu'il soit emprunté à l'énergie totale.

Si une masse d'air comprimé a produit un travail extérieur de 425 kilogrammètres, son énergie utile a baissé d'autant; mais son énergie totale n'a pas baissé : on en est sûr si l'on trouve que l'air n'est pas refroidi. On est certain dès lors que l'air comprimé a récupéré quelque part les 425 kilogrammètres dépensés en travail ou leur équivalent. En fait, c'est qu'il a emprunté à l'extérieur une calorie.

*L'air comprimé est donc susceptible de puiser à l'extérieur, dans un milieu à température uniforme, de l'énergie calorifique pour la transformer en travail.* On pourrait dire qu'il restaure ainsi de l'énergie utile, mais c'est aux dépens de sa propre énergie utile, qui résulte elle-même d'une dépense préalable de travail. *Il est donc un accumulateur, — non un créateur, — d'énergie utile.*

## § 2. — LE FROID PRODUIT PAR LA DÉTENTE.

Qu'arriverait-il, si on ne laissait pas l'air comprimé qui se détend récupérer, à chaque instant, dans le milieu qui l'entoure, la chaleur équivalente au travail qu'il accomplit? Si la détente, par exemple, était trop brusque pour que l'équilibre thermique se maintînt? ou encore si la paroi du réservoir qui contient le gaz était imperméable à la chaleur? C'est à sa propre

chaleur que l'air comprimé devrait prendre l'équivalent du travail dépensé. Il se refroidirait.

C'est, en effet, à la détente brusque des gaz que l'on s'adresse pour produire le froid. C'est à cette détente qu'a eu recours le physicien français Cailletet dans les expériences où il a, le premier, montré que l'oxygène et l'azote étaient liquéfiables par le froid. C'est cette détente qu'utilise l'appareil de Georges Claude pour la fabrication de l'air liquide.

En se détendant de 20 atmosphères à 1 atmosphère, un gaz, à peu près parfait, se refroidit de 0 degré à 160 degrés au-dessous de zéro. Comme l'air se liquéfie à 190 degrés au-dessous de zéro, sous la pression ordinaire, on voit qu'en détendant de l'air qui a été comprimé à 20 atmosphères, on n'ira pas très loin du point de liquéfaction ; et, en détendant ensuite de l'air comprimé déjà refroidi par le contact de cet air froid, on ira jusqu'au liquide.

Mais pour que la détente donne son plein effet, il faut que l'énergie utile de l'air comprimé se dépense intégralement en travail extérieur. Il faut, comme l'a très bien vu M. Claude, faire rendre à cet air qui se détend le maximum de travail qu'il peut fournir, en opposant à chaque instant une contre-pression à sa pression, ce qui est réalisé, — et l'est seulement, — lorsque l'air qui se détend pousse devant lui le piston d'une machine ou les aubes d'une turbine fonctionnant en charge. Si on laisse l'air se détendre à vide, le travail d'expansion effectué est nul; l'air n'est plus, suivant l'expression de M. Claude, qu'un « enfonceur de portes ouvertes ». Et alors la perte d'énergie utile qu'entraîne la détente n'est compensée par rien : il y a dégradation pure et simple.

Quand de l'air comprimé se détend dans le vide, il faut considérer ces deux phases du phénomène, que Tait a très bien décrites : dans la première phase, l'air enfermé dans le réservoir primitif se détend et se

refroidit : à la faveur de la diminution d'énergie utile qu'entraîne la détente, de la chaleur prise à la masse d'air elle-même peut être convertie en travail : ce travail est employé ici à créer la force vive de l'air qui se précipite avec violence dans le réservoir vide ; et, dans une dernière phase, cette force vive, n'ayant à vaincre aucun travail extérieur, se retransforme en chaleur. Si on peut supprimer cette seconde phase, on évite une dégradation inutile.

A vrai dire, il n'y a qu'*à peu près* équivalence entre la chaleur regagnée par perte de force vive de l'air qui vient remplir le réservoir vide, et la chaleur perdue par détente dans le réservoir initial. L'air n'étant pas un gaz parfait, pas plus qu'aucun gaz réel, il se trouve que son énergie totale, à une température donnée, n'est pas rigoureusement indépendante de sa pression. Elle diminue légèrement quand sa pression augmente. Un réservoir d'air à 20 atmosphères contient beaucoup plus d'*énergie utile*, mais *un peu moins d'énergie* que l'ensemble de vingt réservoirs à la pression ordinaire. Cette diminution légère de l'énergie par la compression d'un gaz arriverait à être notable si la compression était énorme. Joule et lord Kelvin l'ont montré dans des expérienees de laboratoire très délicates, mais dont l'industrie a fini par s'emparer. En se détendant *sans aucun travail extérieur* d'une certaine pression à une pression inférieure à celle-là d'une atmosphère, l'air se refroidit d'environ un quart de degré centigrade. Pour avoir un refroidissement de 50 degrés, en utilisant cette propriété, il faudrait une détente sans travail de 200 atmosphères ; par exemple, une décompression qui fît passer de l'air comprimé de 220 à 20 atmosphères : c'est ce qu'a réalisé l'ingénieuse machine à air liquide de Linde.

Cette machine a un grand intérêt pour le physicien. Elle a le mérite de bien montrer la légère

*augmentation* d'énergie totale de l'air par la détente à température constante.

C'est bien en ce sens, en effet, que la variation de l'énergie a lieu, en dépit des apparences. Si l'énergie, à la même température est un peu plus *forte* à pression plus *basse*, et que les conditions de l'expérience imposent l'invariabilité de l'énergie, il faudra qu'à plus basse pression, la température soit un peu plus basse. C'est ce que donne l'expérience. C'est encore un exemple caractéristique à citer aux gens qui confondent l'énergie et l'énergie utile. De l'air ordinaire à zéro degré et à 220 atmosphères contient évidemment *plus d'énergie utile* que la même masse d'air à zéro degré et à 20 atmosphères ; mais il contient, au total, un peu *moins d'énergie*.

La machine de Linde n'utilise pas, en définitive, le phénomène principal, du froid par détente brusque productrice de travail : elle laisse perdre la plus grande partie de l'énergie utilisable emmagasinée dans l'air comprimé, et utilise seulement le phénomène accessoire de la légère augmentation d'énergie totale par décompression. Elle est incomparablement inférieure à une machine telle que celle de Claude où l'on se sert du phénomène principal arrêté à sa première phase, sans laisser se produire la dégradation subséquente du travail en chaleur nuisible. — La machine de Linde, c'est le second appareil de Joule, où les deux vases sont réunis dans le même récipient, et où la détente d'un vase dans l'autre produit « à peine une légère variation de température », mais en réalité une légère baisse. — La machine de Claude c'est le premier appareil de Joule, dans lequel on s'est débarrassé du vase qui se réchauffe pour ne conserver que celui qui se refroidit. Il faut lire le mémoire de M. Claude pour se rendre compte à quel point l'idée théorique de réduire au minimum la dégradation d'énergie a heureusement guidé un industriel, aux

prises avec des difficultés pratiques, qui avaient paru, avant lui, insurmontables.

### § 3. — COMMENT LA DÉTENTE JUSQU'AU VIDE, D'UNE MASSE FINIE DE GAZ, PEUT DONNER UN TRAVAIL INFINI.

A température donnée, l'énergie utile d'une masse de gaz comprimée augmente avec sa pression. Si le gaz est parfait, l'énergie utile croît en proportion arithmétique quand la pression croît en proportion géométrique. Pour doubler la pression, à partir d'une pression initiale quelconque, il faut toujours le même travail. On peut retirer toujours le même travail d'un dédoublement de la pression.

Si l'on réduit de moitié la pression primitive, puis qu'on réduise encore de moitié la nouvelle pression, et ainsi de suite, jusqu'à une pression infiniment faible, on pourra tirer de chaque descente d'un degré une dose constante de travail. Et, par conséquent, en détendant un gaz, à partir d'une pression quelconque, et poussant la détente jusqu'au vide, on pourra, *théoriquement tout au moins*, lui faire produire une quantité de travail infinie.

Pour prendre un exemple concret, 1 gramme d'hydrogène, à zéro degré, occupe sous la pression normale un volume d'environ 11 litres. Si cette masse de gaz se détend jusqu'à une pression d'une demi-atmosphère, elle occupera un volume double, soit 22 litres. Dans cette transformation, elle a pu accomplir un travail de 80 kilogrammètres. Vient-on à détendre encore jusqu'à un quart d'atmosphère, de façon que le volume passe de 22 à 44 litres, elle accomplira, dans cette détente nouvelle, un nouveau travail de 80 kilogrammètres. Il est aisé de comprendre qu'une même masse de gaz — comme un gramme d'hydrogène, — rende la même quantité de

travail en se détendant de 11 à 22 litres ou de 22 à 44. Dans la seconde opération, tous les volumes sont doubles de ce qu'ils sont dans la première; toutes les pressions sont réduites à moitié: le travail qui s'obtient à chaque instant en multipliant la pression par l'augmentation de volume garde dans les deux cas la même valeur. 80 kilogrammètres encore seront fournis par la détente entre un quart et un huitième d'atmosphère, qui porte le volume de 44 à 88 litres ; 80 kilogrammètres par une détente de la même masse d'un gramme, depuis un huitième jusqu'à un seizième d'atmosphère, et ainsi de suite. Avant d'avoir atteint une pression rigoureusement nulle, le gaz aurait doublé de volume et dédoublé de pression un nombre indéfini de fois, et dans ces dédoublements successifs en nombre illimité, il aurait, un nombre infini de fois, accompli un travail de 80 kilogrammètres. Il aurait donc bien, par détente à température constante poursuivie jusqu'au vide, accompli un travail infini.

Ce résultat, d'allure paradoxale, est essentiel à qui veut comprendre le renversement des changements d'état physiques ou chimiques, et notamment de la vaporisation et de la dissociation. Il s'agit d'un cas théorique. Il faudrait opérer sur un gaz parfait, satisfaisant aux lois de Mariotte et de Gay-Lussac, et non liquéfiable. Les gaz réels réalisent ces conditions d'autant plus fidèlement qu'ils sont à pression plus basse.

Il faudrait surtout opérer une détente constamment productrice de travail, en équilibrant à chaque instant la pression décroissante du gaz par une contre-pression égale, régulièrement décroissante jusqu'à zéro. Il faudrait enfin produire cette détente en maintenant constante la température du gaz, pour se placer dans les conditions où l'énergie dépensée à produire le travail extérieur est puisée dans le milieu ambiant, et y est prise sous forme de chaleur.

Mais il suffit que cette production d'un travail infini par détente isothermique poussée jusqu'au vide soit théoriquement possible, pour qu'on puisse en déduire la conclusion suivante : un corps liquide ou solide émettant du gaz jusqu'à une pression de vapeur déterminée, — pour laquelle la vapeur peut indifféremment se dégager ou se condenser, — on pourra toujours, par une détente ultérieure, abaisser la pression de vapeur, à la même température, jusqu'à une valeur assez faible pour que la détente isothermique, entre ces deux pressions, compense et permette une restauration d'énergie utile, quelque grande qu'elle soit.

Retenons, en tous les cas, qu'un gaz ou une vapeur, en se détendant, qu'il produise ou non du travail extérieur, perd toujours de l'énergie utile ; et que, de deux masses égales du même gaz, à la même température, la plus comprimée est la plus riche en énergie de qualité supérieure.

# CHAPITRE V

## Formes inférieures de l'énergie. — I. La chaleur.

---

### § 1. — TEMPÉRATURE ET QUALITÉ D'ÉNERGIE.

Une riche source thermale capable de fournir à l'heure 3.000 litres à la température de 45 degrés représente une abondante source de chaleur. A supposer que la température de l'extérieur ait une valeur moyenne de 15 degrés, cela fait 30 grandes calories au litre, ou 90.000 grandes calories à l'heure, gratuitement apportées de l'intérieur de la terre. Avec toutes ces calories, il n'y a pourtant pas de quoi faire cuire un œuf à la coque.

Il suffit bien, pour cuire l'œuf, de le maintenir trois minutes dans l'eau bouillante : mais il faut de l'eau bouillante. Et d'innombrables calories prises à une source à 45 degrés ne sauraient suppléer quelques calories en très petit nombre prises à 100 degrés.

Si nous supposions une source thermale à 100 degrés, nous pourrions, à volonté, transformer les calories qu'elle nous apporte à 100 degrés, en calories à 45 degrés, en mêlant l'eau chaude à de l'eau froide. Mais l'inverse ne sera pas réalisable, tout au moins directement. Avec autant de calories que l'on veut,

prises à 45 degrés, on n'en fait pas une prise à 100 degrés.

Les énergies calorifiques que contient une calorie à 100 degrés et une calorie à 45 degrés ne sont donc pas équivalentes en *qualité*. Celle qui est fournie à la température la plus haute est de meilleure qualité: toutes deux sont de qualité inférieure à de l'énergie mécanique ou électrique.

Dans la production de la chaleur à partir de l'énergie mécanique ou électrique, on n'est limité par aucune température. Si l'on fait passer un courant électrique dans un fil résistant plongé dans un milieu porté déjà à température élevée, le courant électrique aura toujours pour résultat d'élever encore la température en passant.

Seuls, les moyens matériels limitent pratiquement la température atteinte. Il faut des métaux ou des charbons réfractaires pour conduire le courant : mais on atteint, dans l'arc voltaïque, la température de volatilisation du charbon, 3.500 degrés.

L'énergie mécanique, transformée par frottement, peut également fournir de la chaleur à une température aussi élevée que l'on veut et, de même, toutes les formes que nous avons décrites comme supérieures. Mais tandis qu'il n'y avait qu'une qualité supérieure d'énergie, il y a autant de degrés dans la qualité inférieure qu'il y a de températures.

## § 2. — LA TEMPÉRATURE ABSOLUE.

C'est justement à la faveur de cette différence de qualité que l'on peut réaliser la transformation partielle de la chaleur en travail. Une différence de température peut toujours se traduire par une différence de pression. Entre deux réservoirs qui contiennent tous deux de l'eau et de la vapeur, et dont l'un est plus chaud que

l'autre, existe une différence de tension de vapeur, qui pousse le liquide à distiller du réservoir chaud vers le froid. C'est le principe de la *paroi froide*. C'est le principe de l'alambic.

Une machine à vapeur possède les organes essentiels d'un alambic, mais elle en possède un de plus : le corps de pompe, où la vapeur travaille entre le moment où elle est sortie de la chaudière et celui où elle arrive dans le réfrigérant. Si la chaudière est portée à 100 degrés et si le réfrigérant est maintenu à zéro degré, la vapeur pourra se détendre, entre la pression de 760 millimètres et la pression de $4^{mm},6$ qui est la pression de vapeur saturée à zéro ; et, par cette détente, elle pourra pousser un piston. *Mais cette détente et cette production de travail sont limitées par la différence de température.* Si la différence de température de la chaudière et du réfrigérant n'était que de 1 degré, la différence des pressions de saturation serait très faible, et le travail à tirer de la détente insignifiant. On peut calculer ce que serait le travail dans une machine à vapeur fonctionnant entre 100 degrés et 0 degré. La machine est bien entendu supposée parfaite, c'est-à-dire il n'y a par ailleurs aucune perte de chaleur inutile, la détente se fait à plein travail. En utilisant les nombres déterminés par Regnault pour les chaleurs spécifiques et les chaleurs latentes, on déduit d'un calcul assez simple que, sur 373 calories fournies par la chaudière à 100 degrés, 100 calories au maximum seraient transformées en travail, et le reste, soit 273 calories, serait restitué au condenseur à zéro degré.

Pour faire comprendre que le rendement en travail d'une machine à vapeur soit aussi faible, on n'a jamais rien écrit de plus clair que les pages mêmes de Sadi Carnot. Nous aurons l'occasion d'en citer quelques passages. Mais pour donner l'intelligence complète du mécanisme réel de la transformation de

la chaleur en travail, il faudrait recourir à la considération des *cycles de transformation*. Pour assurer une transformation régulière de chaleur en travail à l'aide d'un fluide — comme l'eau, vapeur ou liquide, — il faut faire subir au fluide une série de changements qui le ramènent à son état primitif : puis on recommence. Dans la machine à vapeur, on reprend l'eau de condensation et, avec une pompe telle que l'injecteur Giffard, on la fait rentrer dans la chaudière : alors le cycle est fermé. Le travail accompli par la vapeur n'est en définitive que la différence entre celui qu'elle exécute dans son expansion et celui qu'il faut dépenser pour la comprimer à nouveau et la ramener à son état initial *par une autre voie*. On aura donc une idée certainement exagérée du travail total en n'ayant égard qu'au travail d'expansion accompli par la vapeur.

Ce travail d'expansion lui-même, un raisonnement grossier le montre étroitement limité, dans les circonstances les plus favorables, par la différence des températures. Il suffit d'appliquer à la vapeur, *traitée comme un gaz parfait*, le résultat relatif au travail de détente d'un gaz. *Si, la température étant maintenue constante*, on pouvait détendre la vapeur depuis $760^{mm}$ de pression jusqu'à une pression exactement nulle, on en tirerait un travail infini. On pourrait, avec une dose limitée de vapeur, ne servant qu'une fois, prendre un nombre indéfini de calories à la chaudière et les transformer toutes en travail. Mais la détente est limitée : si le condenseur est à zéro degré, elle ne peut se produire que jusqu'à la pression de $4^{mm},6$; et il y a, contrairement aux apparences, bien plus *d'écart* entre cette pression de $4^{mm},6$ et une pression exactement nulle, qu'entre la pression de $760^{mm}$ et celle de $4^{mm},6$. Pour passer de la pression de $760^{mm}$ à celle de $4^{mm},6$, il suffit de *dédoubler* la pression sept ou huit fois de suite, et à chaque dédoublement correspon-

drait, pour un gaz parfait, le même travail. Pour passer de $4^{mm},6$ à 0, il faudrait *dédoubler* la pression un nombre indéfini de fois. Entre deux pressions déterminées, la détente de la vapeur donnera donc une dose toujours limitée de travail, d'autant plus grande qu'il faudra dédoubler un plus grand nombre de fois la pression la plus forte pour tomber à l'autre.

Le rapport de la chaleur qui, dans les cas les plus favorables, retombe au réfrigérant, à la chaleur qui a été puisée à la chaudière, est indépendant de l'agent de transmission; il caractérise l'*intervalle* des deux températures, en donnant à ce mot la même signification qu'il a dans l'expression : *intervalle* musical. La température d'une chaudière sera, par définition, *à l'octave* de celle du condenseur, — elle sera, au sens absolu du mot, *double* de l'autre — si l'on peut, réduire à la moitié de la chaleur prise à la chaudière la chaleur rendue au condenseur, et par conséquent, si l'on peut transformer en travail la moitié de la chaleur prise à la chaudière. C'est lord Kelvin qui aperçut cette conséquence nécessaire des idées de Carnot, et qui donna le moyen de définir le *rapport de deux températures* d'une façon absolument indépendante de toute échelle thermométrique particulière. C'est ainsi qu'on trouve que le rapport de la température de la glace fondante à la température de l'eau bouillante est mesuré par la fraction $\frac{273}{373}$ et, d'une façon générale, par le rapport des nombres de degrés centigrades qui caractérisent les deux températures, à condition d'ajouter à chacun d'eux le nombre 273.

Il n'est pas difficile d'expliquer l'origine de ce nombre 273. *Un gaz parfait*, qui suit la loi de compressibilité de Mariotte et la loi de dilatation de Gay-Lussac, augmente de pression si on le chauffe à

volume constant; et pour chaque degré centigrade, la pression s'élève de 1/273e de la pression du gaz à zéro degré.

Il en résulte que, dans une machine thermique, dont la chaudière serait à zéro degré et le réfrigérant à 1 degré au-dessous de zéro, $\frac{1}{273}$ seulement de la chaleur de la chaudière pourrait être transformé en travail. Si l'on venait à refroidir de un degré, puis de deux, de trois degrés, la température du condenseur, sans toucher à celle de la chaudière, on gagnerait à chaque degré un *deux cent soixante-treizième* de chaleur, à pouvoir transformer en travail. Si on refroidissait le condenseur jusqu'à 273 degrés au-dessous de zéro, c'est l'intégralité de la chaleur de la chaudière qu'on pourrait transformer en travail. On ne peut pas concevoir qu'on aille plus bas. Cette température, que Thomson a appelée le *zéro absolu*, est donc, par définition, la température à laquelle il faudrait maintenir le condenseur d'une machine thermique pour pouvoir transformer en travail toute la chaleur de la chaudière. On pourrait encore la définir : c'est la température à laquelle un gaz parfait, refroidi à volume constant, marquerait une pression réduite à zéro. On pourrait dire encore que c'est une température à laquelle la tension de vapeur d'un liquide ou d'un solide quelconque serait nulle : ce qui permettrait à la vapeur fournie par une chaudière quelconque une détente poussée jusqu'au bout.

De gaz parfait, il n'y en a plus à ces très basses températures, puisqu'ils se liquéfient tous par un froid suffisant. Mais il est possible, sinon facile, de repérer sur un thermomètre réel les températures que marquerait ce thermomètre idéal. Il est possible, d'une façon générale, de graduer un thermomètre donné, — thermomètre ordinaire à mercure, aux températures moyennes, — thermomètre électrique aux

très hautes ou aux très basses températures, — en *températures absolues.*

Et le *zéro absolu* se trouverait à —273° de l'échelle centigrade ordinaire. *Pratiquement, la température absolue est égale à la température centigrade comptée à partir de — 273 degrés.*

Dans la course aux très basses températures, le laboratoire de l'Université de Leyde, dont la célébrité était classique dès le XVII<sup>e</sup> siècle, détient jusqu'ici le record. Le professeur Kamerlingh Onnes semble être arrivé jusqu'à 10 degrés absolus, soit —263°. Aller plus bas n'est pas impossible, mais est difficile : la difficulté thermodynamique qu'il y aurait à passer de 10 degrés à 5 degrés absolus, c'est-à-dire à descendre encore un échelon d'une octave, est du même ordre que celle qu'il y aurait à monter d'une octave à l'autre bout de l'échelle, et à obtenir une température double de la plus haute température réalisée jusqu'ici.

## § 3. — CE QUE DEVIENT UN CORPS DANS UNE ENCEINTE AU ZÉRO ABSOLU.

La notion de zéro absolu est capitale. Avec un réfrigérant qui serait au zéro absolu, toute machine à vapeur, supposée sans imperfection, pourrait réaliser la transformation complète en travail de l'énergie calorifique de sa chaudière. Quelle que fût la température de cette chaudière, sa chaleur serait de l'énergie de qualité supérieure. Toute l'énergie contenue dans la chaudière serait dès lors de l'énergie utile.

Isolé dans un espace qui serait maintenu au zéro absolu, un corps rayonnerait toute la chaleur qu'il contient.

S'il s'agit d'un espace limité, l'énergie calorifique possédée par le corps s'y étalera et se répandra dans cet espace, tout comme un gaz qui occupe le volume entier qui lui est offert : l'énergie prendra dans l'es-

pace une certaine densité, qui est, précisément, ce par quoi l'on pourra définir la température d'un espace vide de matière. S'il s'agit d'un espace illimité, l'énergie calorifique d'un corps qui y est plongé s'échappe dans tous les sens, et semble véritablement se perdre. La terre isolée dans l'espace rayonne ainsi, chaque nuit, une quantité d'énergie énorme, et elle se refroidirait vite si la chaleur solaire qui lui est versée durant le jour ne venait compenser le rayonnement nocturne. Un équilibre s'établit, moyennant lequel la température moyenne de la terre reste bien constante et voisine de 15 degrés centigrades (288 degrés absolus).

L'énergie que la terre reçoit du soleil est, par minute, de 270 trillions de grandes calories. C'est aussi l'énergie que la surface totale de la terre perd par rayonnement, vers l'espace, en une minute, si l'on admet que cet espace est au zéro absolu, la terre étant à 15 degrés centigrades. Notre atmosphère, heureusement, protège la terre et contre une insolation et contre un refroidissement extrêmes. Quand elle est par trop transparente, c'est alors que se produisent, au printemps, les désastreuses gelées nocturnes, si redoutées des viticulteurs. Elle intervient encore pour atténuer les oscillations séculaires de la température moyenne de l'année, qui doivent accompagner les oscillations certaines de la chaleur rayonnée par le soleil.

La présence immédiate, autour d'un corps, d'un espace vide au zéro absolu, permet d'en extraire toute l'énergie calorifique, comme la présence d'un puits indéfini en un point de la terre permettrait d'extraire toute l'énergie gravifique de la nappe d'eau répandue au voisinage. Mais, de même que toute nappe d'eau ne tarderait pas à se tarir en présence d'un puits sans fond, de même un corps chaud que l'on ne réchauffe pas ne mettrait pas longtemps à abandonner toutes ses

calories en présence d'un milieu au zéro absolu. Et si l'on supposait surtout qu'un corps fût exposé au refroidissement par toute sa surface réelle, par toutes ses molécules disséminées dans l'espace et écartées les unes des autres au lieu d'être empilées comme elles le sont d'habitude, on trouverait qu'un gramme de matière rayonne vers l'espace des doses formidables d'énergie. L'exposé des lois du rayonnement et de la conception de l'équilibre mobile nous fera comprendre qu'il s'agit là d'énergies échangées entre molécules d'un même corps, et que l'énormité de leur valeur prouve l'énormité d'un simple chiffre d'affaires, non celle d'un profit ou d'une perte définitive.

Cette notion du zéro absolu vient justifier, par ailleurs, la définition que l'on donne parfois de l'énergie calorifique totale d'un système matériel : c'est la quantité totale de chaleur qu'il faudrait lui enlever pour l'amener au zéro absolu. Cette énergie calorifique totale, qui n'est pas de l'énergie libre, est en général fort peu utilisable : elle serait intégralement utilisable si l'on disposait d'un condenseur de machine à vapeur refroidi au zéro absolu. L'énergie calorifique totale d'un système isolé représente donc, abstraction faite de ses énergies moléculaires ou atomiques, le maximum de l'énergie utilisable qu'il puisse livrer.

Mais, dans l'énoncé de cette proposition, il ne faut pas oublier de dire : « l'énergie calorifique d'un système *isolé* ; » car si le système matériel est en contact permanent avec un milieu extérieur à température constante, on peut parfois, par son intermédiaire, recueillir plus de travail utile que le système n'en contient lui-même, et trouver des circonstances où l'*énergie utilisable* d'un système dépasse son énergie. L'air comprimé, la pile à chaleur voltaïque supérieure à sa chaleur chimique, nous en ont fourni précisément des exemples.

# CHAPITRE VI

## Formes inférieures de l'énergie.
## II. La lumière.

---

### § 1. — L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA LUMIÈRE ET LA COMPLEXITÉ DU SPECTRE.

Il peut sembler étrange de ranger la lumière parmi les formes inférieures de l'énergie. Telle est pourtant la place que lui assigne une classification rationnelle des énergies de diverses qualités. Et la connaissance de la vraie place réservée dans cette classification aux diverses lumières n'est point indifférente à qui se préoccupe du problème de l'éclairage artificiel.

Tandis qu'il n'y a qu'une catégorie d'énergies de qualité supérieure, il y a, au contraire, autant de catégories d'énergie calorifique que de températures différentes et, de même, autant de catégories d'énergie lumineuse que de lumières différentes. La qualité d'une lumière est d'autant meilleure, qu'elle est plus bleue : une lumière rougeâtre est la plus mauvaise ; à mesure qu'elle tire sur le jaune et le vert, elle est de qualité meilleure; plus enfin elle contient de rayons bleus et violets, et plus sa qualité, au sens thermodynamique du mot, est élevée. Une lumière, peut-on dire encore, représente une énergie d'autant plus

relevée qu'elle émane d'une source à plus haute température. Sans préciser encore, pour l'instant, cette notion de qualité d'une lumière, nous pressentons déjà que produire de la lumière par voie purement calorifique sera, *a priori*, une mauvaise combinaison : la produire à partir d'une énergie de qualité supérieure, telle que l'énergie électrique *non dégradée*, sera au contraire augmenter les chances de bon rendement.

On emploie quelquefois l'expression *équivalent mécanique de la lumière*, pour désigner le nombre de *bougies* qu'on peut obtenir, dans les conditions les plus favorables, avec une dépense donnée de puissance mécanique ou électrique. — Les pouvoirs éclairants des sources de lumière sont, on le sait, évalués en *bougies*. La bougie est sensiblement le pouvoir éclairant d'une bougie française de l'Étoile. — Pour entretenir une lumière, il faut une dépense permanente d'énergie : énergie chimique mise en jeu dans la combustion d'une bougie ou du gaz, énergie électrique comme dans la lampe à incandescence. Un nombre donné de bougies, entretenues d'une manière continue, suppose la dépense d'une puissance déterminée : c'est ainsi que, d'après M. Ch. Féry, une source idéale fournirait 10 bougies par watt en lumière blanche ; une source de lumière monochromatique donnant une lumière verte choisie dans la région la plus lumineuse du spectre pourrait fournir jusqu'à 17 bougies par watt. Pour montrer à quel point la pratique s'éloigne de ces rendements, il suffira de rappeler qu'il faut 60 watts environ pour entretenir une lampe électrique ordinaire à incandescence de 16 bougies, ce qui fait à peine un quart de bougie par watt.

Mais l'équivalent mécanique de la lumière n'est nullement quelque chose d'aussi bien défini, objectivement, que l'équivalent mécanique de la chaleur.

Quand on parle de lumière, on fait, par là même, intervenir la sensibilité particulière de nos organes, et on prétend opérer un triage arbitraire dans les radiations qui émanent du corps lumineux; on ne compte comme bonnes, comme utiles, que celles qui correspondent à un nombre de vibrations compris entre 400 trillions et 800 trillions par seconde. Effectivement, parmi l'énergie rayonnée totale émanée de la source, on n'a que faire de celle qui correspond à des notes trop aiguës ou trop basses, à des vibrations riches en actions chimiques, ou sensibles seulement par la chaleur qu'elles apportent aux corps absorbants. Non seulement on n'en a que faire, mais elle est souvent nuisible. Et cette énergie rayonnée en dehors du spectre visible, représente pratiquement la presque totalité de l'énergie rayonnée.

Il existe, en effet, d'autres rayons que les rayons lumineux visibles, et tous obéissent aux mêmes lois. Newton avait séparé les unes des autres les radiations visibles de diverses couleurs; Fresnel a montré que ces couleurs diverses sont des notes, ne différant que par leur nombre de vibrations, c'est-à-dire par leur hauteur : du rouge au violet, il y a l'intervalle d'une quinte. C'est tout ce que notre œil perçoit : tandis que notre oreille est sensible à des notes échelonnées sur sept ou huit octaves, notre œil ne perçoit pas tout à fait une octave entière de vibrations. Mais il ne s'ensuit pas qu'il n'y ait que ces notes visibles dans le clavier infiniment riche des vibrations que nous envoient le soleil ou les sources de lumière. La découverte de ce clavier est l'œuvre du XIX[e] siècle. William Herschel aperçoit, en 1801, les rayons infra-rouges; ce sont les notes trop graves pour notre rétine; l'année suivante, en 1802, Wollaston trouve les notes aiguës, les radiations ultra-violettes, capables d'agir sur certains composés chimiques; il inaugure par là un chapitre nou-

veau d'optique, la photochimie, d'où Niepce et Daguerre feront sortir la photographie.

Ce clavier s'est enrichi encore dans les dernières années du XIXe siècle. Du côté des notes aiguës, Schumann a révélé, dans le rayonnement de certaines sources, des vibrations ultra-violettes dont la fréquence est de 3.000 trillions par seconde. Par contre, du côté des notes graves, Langley en Amérique, puis Rubens en Allemagne, ont trouvé des notes infra-rouges de plus en plus basses; il en est dont la fréquence ne dépasse pas 4 trillions. Il reste à peine quelques octaves inexplorées avant de rejoindre les plus aiguës des radiations électromagnétiques hertziennes.

Pour donner une idée claire des hauteurs des radiations lumineuses, nous rappellerons à quelle fréquence correspondent les couleurs moyennes du spectre lumineux :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Rouge moyen : | 450 | trillions | de vibrations | par seconde. |
| Orangé | — | 500 | — | — | — |
| Jaune | — | 540 | — | — | — |
| Vert | — | 580 | — | — | — |
| Bleu | — | 620 | — | — | — |
| Indigo | — | 660 | — | — | — |
| Violet | — | 700 | — | — | — |

Ces fréquences énormes ne sont pas quelque chose d'hypothétique. Quand une lumière jaune a brillé durant une seconde, il s'est passé, suivant la juste expression de M. Bergson, 540 trillions « d'événements physiques distincts » qui, d'ailleurs, se sont succédé identiques. L'habitude de la comparaison acoustique nous fait donner à ces événements le nom commode de « vibrations ». Ce nom peut recouvrir les hypothèses les plus diverses, mais le nombre en est parfaitement défini et connu.

La question qu'auront à résoudre les physiciens ou les industriels qui cherchent à perfectionner l'éclairage sera la suivante : Un corps matériel que l'on

chauffe émet en général, à doses variables, un peu de toutes les radiations, depuis les infra-rouges extrêmes, à vibrations lentes de fréquence 4 trillions, jusqu'aux ultra-violettes à vibrations rapides de fréquence 3.000 trillions. Il faudrait produire à volonté les vibrations lumineuses de fréquence intermédiaire entre 450 et 750 trillions, et, si possible, les produire exclusivement.

De là deux problèmes distincts qui s'imposent à l'attention du chercheur : le problème théorique de l'étude générale du rayonnement de l'énergie, et le problème pratique du choix, parmi toutes les radiations, de ces radiations spéciales auxquelles la constitution de notre rétine confère des propriétés si précieuses pour nous.

La solution du premier de ces deux problèmes est la préface nécessaire de toute solution rationnelle du second.

## § 2. — LA THÉORIE GÉNÉRALE DE LA RADIATION DE L'ÉNERGIE.

L'étude générale du rayonnement, ou de la *radiation de l'énergie* était restée, jusqu'à ces dernières années, en dépit de l'œuvre magistrale de Kirchhoff, qu'on n'avait pas assez méditée, l'un des chapitres les plus confus de la physique. L'application du second principe de la thermodynamique est venue apporter dans ce chaos un ordre inattendu. Et, plus que toute autre, l'étude de la radiation est venue justifier cette prophétie de Tait :

« La dissipation de l'énergie n'a pas été bien comprise et beaucoup de résultats qu'elle fournit ont été accueillis avec doute ; quelquefois même on les a tournés en ridicule. Cependant, elle paraît être actuellement la partie de la physique la plus féconde, la plus riche en promesses. »

*L'énergie rayonnée par un corps matériel chauffé dans certaines conditions bien définies, est de tous points équivalente à de l'énergie calorifique prise à la température du corps.* Elle peut, en effet, être à nouveau transformée en chaleur, si elle tombe sur une surface complètement absorbante, telle une surface enduite de noir de fumée. Dans les anciennes expériences de *chaleur rayonnante*, on employait constamment comme source de rayonnement le cube de Leslie, c'est-à-dire une boîte cubique creuse, pleine d'eau bouillante, dont les faces sont noircies au noir de fumée. L'énergie rayonnée par une des faces noires du cube, à 100 degrés, peut être intégralement absorbée par une autre surface noire placée en regard. Elle sera absorbée sous forme de chaleur et servira à relever la température du corps que limite cette seconde surface noire, tant que ce corps sera maintenu plus froid. Si la température de ce second corps vient à s'élever, l'absorption de chaleur continuera jusqu'à ce qu'il atteigne la température même de 100 degrés.

La radiation apparaît ainsi comme un des modes de communication de la chaleur et c'est à ce titre que les principes de la thermodynamique lui sont applicables. Pour faire passer de la chaleur d'un corps matériel à un autre, on peut recourir à la *convection*, c'est-à-dire au transport de matière, — ce que l'on fait, par exemple, quand on mélange des fluides inégalement chauds, — ou à la *conduction*, c'est-à-dire au transport de la chaleur elle-même de proche en proche, d'un point à l'autre d'un même corps matériel, mais par l'intermédiaire de la matière. Nous voyons qu'on peut recourir encore au *rayonnement* qui réalise un transport de chaleur sans aucun intermédiaire matériel, mais qui, ainsi que les deux autres modes, ne se fait spontanément que dans le sens du transport de chaleur d'un corps plus chaud sur un corps plus froid.

Cette possibilité de communiquer de la chaleur par l'intermédiaire de l'énergie rayonnée, justifierait, à elle seule, l'ancien nom de *chaleur rayonnante*. Ce nom avait même, à l'insu des physiciens qui s'en servaient, une signification plus profonde, puisqu'on y pouvait voir l'expression de *l'identité de qualité* entre l'énergie émise par un corps complètement absorbant à température donnée, et l'énergie calorifique à la même température.

Le nom de « chaleur rayonnante » n'était donc pas mauvais. Par contre, celui de *rayons calorifiques*, appliqué aux rayons infra-rouges, était déplorable. Cette expression impliquait, en effet, l'idée que tous les rayons du spectre ne sont pas calorifiques. Or, il en est qui ne transportent qu'une quantité infime d'énergie ; mais par le fait qu'ils ont une action quelconque, par le fait seul qu'ils existent, ils transportent nécessairement une quantité d'énergie qui sera complètement absorbée et transformée en chaleur s'ils viennent à tomber sur un corps parfaitement absorbant.

L'équivalence complète entre l'énergie rayonnée par un corps et la chaleur prise à cette même température suppose une condition : c'est que ce corps puisse à son tour absorber et transformer en chaleur l'intégralité de cette énergie. De là, dans la théorie thermodynamique de la radiation, le rôle si bien aperçu par Kirchhoff du corps complètement noir « vollkommen schwarz ». Le corps complètement noir absorbe par définition, pour la transformer en chaleur, toute l'énergie rayonnée qui tombe sur lui, et celle qu'il émet à son tour sera complètement définie dès que l'on connaîtra sa température.

C'est donc par le corps noir qu'il faudra commencer toute étude de la radiation, quitte à voir ensuite, comme l'a cherché Kirchhoff, quelles modifications il faut faire subir aux raisonnements et aux conclusions quand on passe du *corps noir* au *corps coloré*.

### 3. — LE CORPS NOIR.

Le *corps noir* est le *radiateur intégral*. Il émet, à une température donnée, toutes les radiations que peut émettre un corps porté à cette température. Un corps moins complètement absorbant émettra, par contre, moins de radiations ; et la relation entre son absorption et son émission constituera précisément la grande loi de Kirchhoff.

Mais avant d'aborder l'étude plus complexe des corps partiellement absorbants, ou colorés, il est bon de remarquer qu'il s'en faut que l'étude de la radiation du corps noir présente un intérêt exclusivement théorique.

Nous ne sommes pas sûrs d'avoir jamais des substances complètement absorbantes à toute température. Le noir de fumée est bien noir aux basses températures. Chauffé au rouge et au blanc, il ne cesse pas pour cela d'être *noir* au sens de Kirchhoff, c'est-à-dire intégralement absorbant pour tous les rayons qui tombent sur lui. Mais nous n'en sommes plus aussi sûrs ; il nous est, en tous les cas, moins aisé de l'éprouver ; nous ne voyons pas, par exemple, comment nous vérifierons si du charbon porté à 3.000 degrés, absorbe intégralement les rayons lumineux venus d'une bougie, et n'en diffuse pas quelques-uns qui se superposent aux rayons émis par le charbon lui-même.

Il existe un moyen de réaliser pratiquement et à coup sûr « le corps noir parfait » à toute température. Quand on veut dire que la nuit est très obscure, on dit couramment : « Il fait noir comme dans un four. » C'est le four qui réalise le corps noir.

Dans un four de boulanger, attendons que s'établisse une température uniforme : à travers une petite

ouverture ménagée dans une paroi, la paroi intérieure opposée envoie un faisceau de rayons qui est celui qu'émettrait, par sa surface extérieure, un corps noir parfait à la même température. Si cette surface intérieure est polie et réfléchissante, ou si elle est capable de diffuser une partie de la lumière qu'elle reçoit, ou encore si elle a une certaine transparence, elle émet par elle-même moins de rayons que si elle était noire; mais, par contre, elle renvoie à travers la petite ouverture des rayons émanés d'autres parties du four ou de points plus profondément situés dans la paroi; et la compensation est exacte. Plus simplement, une paroi qui ne serait ni réfléchissante ni diffusante, mais qui ne serait pas tout à fait opaque, laisserait filtrer, sans les absorber, quelques-uns des rayons reçus; mais elle deviendrait toujours opaque sous une épaisseur suffisante; et sous une grande épaisseur, elle rayonnerait exactement comme le corps noir. C'est ainsi qu'une flamme gazeuse, colorée quand elle est mince, émet un spectre d'autant plus complet qu'elle est plus épaisse, et, très épaisse ou très dense, envoie les mêmes rayons qu'un corps parfaitement noir.

Comment varie, avec la température du corps noir, l'énergie qu'il émet par rayonnement? Elle varie et en quantité et en qualité. La dose d'énergie émise augmente, et très rapidement, avec la température. La qualité change aussi quand la température s'élève; et la lumière devient plus riche en rayons de fréquence élevée. Les lois de Stefan et de Wien régissent ces deux modifications.

La loi de Stefan indique que la dose d'énergie rayonnée à la seconde par un centimètre carré de corps noir est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue de ce corps. Si, à 1.000 degrés, — soit 1.273 degrés absolus, — le corps

noir rayonne 3 cal., 36 par seconde : à une température absolue double, de 2.273 degrés ou 2.546 degrés absolus, il rayonnera 16 fois plus, soit 53 cal., 8. Et la loi s'est montrée si rigoureusement vérifiée qu'elle sert aujourd'hui pratiquement à évaluer la température des fours à porcelaine. Désormais, au lieu d'introduire un thermomètre quelconque, électrique ou autre, à l'intérieur du four, on recueille au contraire à l'extérieur un faisceau de rayons émanés d'une paroi intérieure par une toute petite ouverture, et on le reçoit sur une lunette qui le concentre sur sa croisée de réticule, où il rencontre une soudure thermo-électrique : c'est le pyromètre de Féry.

Si un corps noir à 1.000 degrés rayonne vers une enceinte à 100 degrés, on calculera l'énergie envoyée par le corps à l'enceinte en raisonnant comme si le corps à 1.000 degrés rayonnait vers un espace au zéro absolu, puis en cherchant ce que l'enceinte à 100 degrés enverrait à son tour à un corps maintenu au zéro absolu, et en faisant la différence : la chaleur envoyée par le corps à l'enceinte résulte d'une balance de profits et pertes, chacun des deux termes de cette soustraction se calculant séparément, sans avoir égard à l'autre. On admet ainsi que le rayonnement du corps noir est déterminé par sa température seule et n'est pas directement influencé par les corps qui reçoivent ce rayonnement. C'est la vieille *théorie des échanges* de Prévost.

### § 4. — LA THÉORIE DES ÉCHANGES DE CHALEUR ET SES APPLICATIONS. — LOI DE KIRCHHOFF. — PRESSION DE RADIATION.

La théorie des échanges consiste en ce que des corps maintenus dans une enceinte à température uniforme échangent entre eux des doses d'énergie

égale et rayonnent réellement l'un vers l'autre des quantités d'énergie qui se font équilibre.

Supposons, en effet, qu'un de ces corps soit enlevé de la chambre et porté au milieu de corps plus froids : il rayonnera vers eux. Supposons au contraire qu'un corps plus froid soit porté dans la chambre à la place d'un corps plus chaud : il va s'échauffer et il va refroidir les autres. Mais le corps froid n'est pas susceptible d'agir directement sur les corps chauds à distance ; *il ne rayonne pas du froid.* Donc il faut admettre, avec Prévost, qu'un corps chaud émet toujours des rayons de chaleur, même lorsqu'il n'existe aucun corps froid pour les recevoir, et que, si la température d'un corps ne change pas quand il est dans une enceinte à la même température, c'est parce que le corps reçoit de l'enceinte, par rayonnement, autant de chaleur qu'il en envoie à l'enceinte. C'est en cela que consiste la théorie des échanges, ou théorie de *l'équilibre mobile.*

Si un corps est plus chaud que le milieu, et s'il se refroidit, ce n'est pas qu'il ne reçoive aucune chaleur du milieu ; c'est qu'il en reçoit moins du milieu qu'il ne lui en envoie lui-même. En définitive, il perd de l'énergie parce qu'il en reçoit moins qu'il n'en donne. C'est la théorie des échanges, associée au principe de Carnot, qui a servi de point de départ à tous les raisonnements par lesquels on a établi la loi de Kirchhoff, l'existence de la pression de radiation et les lois numériques de Stefan et de Wien.

Kirchhoff a montré d'abord que la théorie des échanges était applicable, non pas seulement à la quantité totale de rayonnement émanée d'un corps, mais encore à chaque espèce de radiation particulière comprise dans ce rayonnement.

Kirchhoff a pris comme exemple trois types de corps :

Le noir de fumée qui réfléchit à peine les rayons

qu'il reçoit et n'en transmet aucun : presque tout est absorbé ;

L'argent poli réfléchit presque tous les rayons, n'en absorbe que la quarantième partie environ et n'en transmet aucun ;

Le sel gemme réfléchit moins de la douzième partie de ce qu'il reçoit, n'absorbe presque rien et transmet presque tout, même en lames assez épaisses.

Supposons que ces propriétés des trois substances aient été observées à 100° et que les substances citées soient placées dans une enceinte dont les parois soient à la même température. L'équilibre mobile exige que le noir de fumée absorbe autant d'énergie venue de l'argent ou du sel gemme, que l'argent ou le sel gemme d'énergie venue du noir de fumée.

Or, la quantité de chaleur émise par le noir de fumée et absorbée par l'argent ou le sel gemme est très faible. Comme le noir de fumée absorbe toute la chaleur rayonnée par l'argent ou le sel gemme, il s'ensuit que la chaleur rayonnée par ces corps doit être faible.

L'on en conclut que le rayonnement d'une substance à une température déterminée, ou son *pouvoir émissif*, est au rayonnement du corps parfaitement noir, comme la quantité totale de chaleur absorbée par cette substance est à la chaleur absorbée par le corps noir.

Le corps noir absorbe tout : son pouvoir absorbant est 100 pour 100, ou 1. Si un autre corps absorbe 40 pour 100, son pouvoir absorbant est $\frac{40}{100}$ de celui du corps noir. Son pouvoir émissif est alors nécessairement les $\frac{40}{100}$ du pouvoir émissif du corps noir à la même température. Le pouvoir émissif rapporté à celui du corps noir, ou *pouvoir émissif*

*relatif*, est égal à la fraction d'énergie absorbée. C'est ce que l'on énonce souvent, sous cette forme abrégée : *le pouvoir émissif d'un corps est égal à son pouvoir absorbant.* Cette proposition constitue la *loi de Kirchhoff.*

Si la loi de Kirchhoff n'était pas vraie, les *échanges* d'énergie entre deux corps de propriétés différentes pourraient ne pas s'équilibrer, et il y aurait ainsi, à l'intérieur d'une enceinte à température uniforme, *création spontanée d'une inégalité thermique, sans dépense de travail.* L'impossibilité d'une telle création est la forme même sous laquelle lord Kelvin a présenté le principe de Carnot. La loi de Kirchhoff en défaut, ce serait la restauration d'une énergie utile assurée sans dégradation compensatrice.

L'application du même principe a permis à Bartoli de prévoir l'existence d'une *pression de radiation*, que Lebedew a, depuis lors, mise en évidence par expérience. Un faisceau de rayons solaires tombant normalement sur une surface noire de 1 mètre carré, exerce sur elle une pression de 4 dixièmes de milligramme. Sur une surface polie, parfaitement réfléchissante, la pression exercée serait double : 8 dixièmes de milligramme.

Pour faire concevoir la nécessité d'une telle pression, on peut imaginer un espace clos, ayant la forme d'un long cylindre dont une base rayonne de la chaleur vers l'autre : cette autre est un miroir parfait qui renvoie par réflexion toute l'énergie reçue. En déplaçant ce miroir le long du cylindre pour le rapprocher de la base rayonnante, immobile, on peut restituer à cette base l'énergie rayonnée par elle plus vite qu'elle ne l'a émise elle-même, et par suite élever sa température. Le principe de Carnot serait en défaut si l'on pouvait créer cette inégalité thermique sans dépense de travail, et si, par conséquent,

l'on n'avait pas une résistance à vaincre pour pousser la surface réfléchissante au-devant des rayons qui la frappent : ce qui revient à dire que les rayons exercent sur la surface une pression.

Une fois démontrée l'existence de cette pression, de nouvelles applications du même principe aux espaces clos à température uniforme, où s'entrecroisent des faisceaux de rayons incidents ou réfléchis, émanés des parois ou de corps intérieurs, conduisent par une série de déductions rigoureuses à la loi de Stefan déjà indiquée, et à la loi de Wien qui sera énoncée plus loin. Il n'est donc pas excessif de dire que toute la théorie de la radiation de l'énergie est un corollaire direct du second principe de la thermodynamique.

### § 5. — COMMENT UN CENTIMÈTRE CUBE DE CHARBON, A LA TEMPÉRATURE ORDINAIRE, PEUT RAYONNER UNE PUISSANCE DE 7.000 CHEVAUX.

En appliquant la théorie de Prévost aux échanges d'énergie entre molécules d'un même corps, on obtient des résultats curieux.

Un mémoire récent de J.-J. Thomson, où l'illustre physicien anglais rattache la radiation à l'émission d'énergie électromagnétique par des électrons vibrants, aboutit à la conclusion paradoxale qu'un centimètre cube d'argent pur à la température de 300 degrés absolus, ou 27 degrés centigrades, rayonne par seconde, par l'ensemble de toutes ses molécules, une énergie équivalente à une puissance de 1.800 chevaux? [1]

Pour faire comprendre comment on peut atteindre ces nombres formidables et quel en est le sens, raisonnons sur un centimètre cube de charbon solide.

1. *Philos. mag.*, août 1907.

Il pèse, si c'est du graphite, 2 gr. 2; et renferme environ 100 milliards de trillions de molécules physiques, — un nombre égal à l'unité suivi de 23 zéros. Chaque molécule peut être regardée comme une petite sphère dont le diamètre est voisin de deux cent-millionièmes de centimètre. Ces molécules sont, à l'état normal, empilées les unes sur les autres. Si on les dispersait et si on les étalait, on arriverait à une surface rayonnante totale de plus d'un hectare, — à peu près un hectare et un quart. Or, un centimètre carré de surface noire rayonnerait, en une seconde, vers un espace refroidi au zéro absolu, une quantité de chaleur égale à $T^4 \times \frac{1,28}{10^{12}}$ petite calorie, c'est-à-dire à environ une petite calorie et quart, divisée par l'unité suivie de douze zéros, et multipliée par la quatrième puissance de la température absolue. A 27° centigrade, ou 300° absolus, cela fait

$$\frac{1,28}{10^{12}} \times 300 \times 300 \times 300 \times 300 = \frac{1}{100} \text{ de petite calorie.}$$

Et un hectare et quart de surface noire à 27° rayonne en une seconde vers un espace au zéro absolu 1.250 grandes calories, soit une puissance de 7.000 chevaux.

Ainsi, l'ensemble des molécules solides d'un centimètre cube de charbon, supposé à 27° centigrade, et plongé dans un milieu à la même température, rayonnent *soit vers l'extérieur, soit les unes vers les autres*, une puissance totale de 7.000 chevaux. Mais il ne faudrait pas croire qu'on pût extraire toute cette puissance de ce petit cube de charbon, ni surtout l'en extraire longtemps. Pour enlever à ce morceau de charbon l'intégralité de l'énergie susceptible d'être rayonnée, il suffirait d'éparpiller les molécules, de façon que chacune d'elles fût écartée de toutes les molécules voisines, — et de les introduire toutes dans un bain au zéro absolu. Ces deux opérations ne seraient

pas très faciles, mais elles se conçoivent bien : alors on extrairait toute l'énergie de radiation de ces molécules de corps noir, mais l'extraction totale ne durerait pas longtemps, et au bout d'une très petite fraction de seconde, le réservoir serait vidé.

Si ce taux énorme de rayonnement d'énergie se maintient dans les conditions normales, c'est qu'on remplit le tonneau à mesure qu'on le vide. Dans un milieu à température uniforme, les échanges, au sens de Prévost, se poursuivent sans discontinuer. Mais il en est de ces échanges d'énergie comme des échanges commerciaux dans un pays dont les importations équilibrent exactement les exportations. Ce pays ne s'est, au total, ni enrichi, ni appauvri. Pour que la comparaison fût exacte, il faudrait faire entrer en ligne de compte, dans le total des échanges, le chiffre des affaires effectuées, à l'intérieur du pays même, entre toutes les villes qui le constituent. On atteindrait ainsi un total formidable, qu'il pourrait être utile de connaître, mais qui ne donnerait aucun renseignement immédiat sur la fortune du pays.

### § 6. — L'ÉCLAIRAGE PAR LES CORPS NOIRS INCANDESCENTS ET LE RENDEMENT PHOTOGÉNIQUE DES SOURCES DE LUMIÈRE.

La seconde modification qu'apporte l'élévation de température à l'émission d'un corps noir est une modification qualitative. Les rayons émis transmettent un mouvement vibratoire de fréquence d'autant plus haute que la température est plus élevée.

En réalité, le corps noir chauffé n'émet jamais un mouvement vibratoire unique : il ne donne pas une radiation monochromatique, correspondante à une note de hauteur déterminée. Il émet toujours en bloc une masse de vibrations formant un spectre continu; mais la radiation en laquelle ce spectre se montre le

plus *riche*, a une fréquence qui augmente simplement en proportion de la température absolue. — En cela consiste la loi de Wien. — A 1.000 degrés absolus, le maximum de l'énergie dans un spectre normal, c'est-à-dire dans un spectre fourni par un réseau, est obtenu pour la fréquence de 102 trillions; à 2.000 degrés absolus, de 204 trillions; à 3.500 degrés, sensiblement à la température de l'arc, de 357 trillions. Il faudrait porter la température à 5.000 degrés pour que le maximum d'énergie fût dans le spectre visible et se trouvât dans l'orangé, à la fréquence de 510 trillions. A 5.000° d'ailleurs, on ne recueillerait encore comme énergie proprement lumineuse qu'une petite partie du rayonnement total.

Au-dessous de 5.000 degrés, et à plus forte raison tant qu'on ne dépasse pas les températures de nos sources de lumière artificielle, on augmentera donc certainement la proportion d'énergie rayonnée sous forme de lumière en élevant la température. Cette proportion d'énergie rayonnée sous forme de lumière s'appelle le *rendement photogénique*. Il reste toujours faible dans nos meilleures sources de lumière; il est de 2,5 °/o dans la lampe à arc; de 1,2 °/o dans le bec Bengel. Il est de 14 °/o pour les rayons venus du soleil.

Encore ce rapport de l'énergie rayonnée entre les limites du spectre visible à l'énergie rayonnée totale, donne-t-il une idée exagérée de l'utilisation de l'énergie par nos sources de lumière. Il ne faudrait pas compter comme franchement bonne, au même titre que l'énergie rayonnée sous forme de lumière jaune ou verte, celle qu'apportent les rayons rouges extrêmes, à peine visibles, et de même celles qu'apportent les rayons violets extrêmes, qui confinent à l'ultra-violet. Ces deux dernières catégories d'énergie, avant d'être ajoutées à celle des rayons les plus précieux pour la vision, devraient être affectées d'un coefficient de réduction proportionné à leur rôle. On a reconnu, par

exemple, que l'utilité des rayons rouges extrêmes pour la vision est, en gros, un centième de celle des rayons verts du spectre : il conviendra de ne compter que pour un centième l'énergie rayonnée sous forme de rayons rouges, et de faire de même pour les rayons violets.

Avec ce mode de calcul, on arrive à reconnaître que le rendement en énergie utile pour la vision — et qu'on peut appeler le *rendement photogénique réduit*, — est plus faible encore ; il s'abaisse à 3 pour mille dans le bec Bengel ; et à 5 °/ₒ environ pour le soleil lui-même, dans lequel l'énergie rayonnée entre les limites du spectre visible atteignait 14 °/ₒ.

Comment peut-on espérer améliorer ces rendements ?

Le ver luisant et les insectes noctiluques nous présentent des sources lumineuses incomparablement mieux adaptées à la vision telle que la réalise l'œil humain. *Car ces sources ne rayonnent aucune fraction d'énergie en dehors des limites du spectre visible; et, dans l'intérieur même de ce spectre, elles rayonnent l'énergie presque exclusivement sous forme de radiations de la couleur la plus utile, sous forme de jaune-vert pour lequel l'œil présente sa sensibilité maximum.*

Ne serait-il pas désirable de fabriquer des sources de lumière artificielles qui émettraient de même des radiations lumineuses à l'exclusion des autres ? La solution de ce problème, vers laquelle s'orientent des tentatives intéressantes, repose avant toute chose sur la division des corps rayonnants en trois grandes catégories : corps noirs, corps colorés, corps luminescents.

Tout corps noir, avons-nous dit, émet, plus ou moins, à la fois toutes les radiations possibles. Celle qu'il émet avec le maximum d'intensité dépend de la température à laquelle il est porté. A tempé-

rature inférieure à 4.000 ou 5.000 degrés, le maximum d'intensité se trouve encore dans la région infra-rouge du spectre. Il faut atteindre 5.000 degrés au moins pour que le maximum d'intensité se trouve dans le spectre visible. Et même à ce moment, à côté de l'énergie servant réellement à la vision, on aura toujours une énergie énorme ne servant à rien. On ne pourra donc jamais dépasser un rendement assez faible, en s'adressant pour produire la lumière aux corps noirs, simplement chauffés. Et se servir de ces corps pour s'éclairer, c'est consentir à un formidable gaspillage d'énergie. C'est allumer un incendie pour faire cuire un œuf. C'est mettre en branle tout un orchestre, allant de la contrebasse à la clarinette, pour avoir quelque chance de produire, dans l'ensemble, quelques notes privilégiées toutes comprises dans un certain intervalle de quinte.

A cet éclairage par corps noirs, on peut rattacher les lampes électriques à incandescence, dans lesquelles un filament de charbon émet un rayonnement calorifique sous l'action de la haute température produite par le courant; — la lampe à arc ordinaire, dans laquelle le foyer de lumière est le charbon positif porté à la température de volatilisation du charbon — et enfin la plupart des flammes, où l'élément éclairant est constitué par des particules de charbon solide échauffées par la combustion : la combinaison la plus avantageuse comportera l'emploi d'un hydrocarbure brûlant avec une flamme très chaude et très riche en carbone, pour que sa combustion soit incomplète : c'est ce que réalise l'acétylène.

## § 7. — L'ÉCLAIRAGE PAR CORPS COLORÉS.

A côté des corps noirs existent des *corps colorés*. Ils ont une propriété générale commune. Portés à la

même température, ils émettent moins d'énergie que le corps noir. Ils ont un pouvoir émissif moindre que 1. Par contre, en vertu de la loi de Kirchhoff, ils n'ont pas un pouvoir absorbant absolu : à une température donnée, et pour une radiation donnée, le pouvoir absorbant d'un corps coloré est égal à son pouvoir émissif *relatif*.

Un corps coloré peut avoir un pouvoir émissif variable : variable avec la température, variable avec la radiation considérée. C'est ainsi que le platine poli a un pouvoir émissif toujours beaucoup plus faible que celui du corps noir, mais qui augmente avec la température : il n'émet que 9 °/₀ environ de l'énergie émise par le corps noir à 373 degrés absolus (à la température de l'eau bouillante); il émet déjà 11 °/₀ de l'énergie qu'émettrait le corps noir, à 795 degrés absolus; il émet enfin 18 °/₀ de l'énergie émise par le corps noir à 1.481 degrés absolus. Il s'ensuit que l'avantage qu'il y a, au point de vue de la production de rayonnement visible, à élever la température, est plus notable avec le platine poli qu'avec un corps noir.

A une même température, le platine poli rayonne moins d'énergie totale que le corps noir, mais il rayonne une meilleure proportion d'énergie utile à la vision. A 1.850 degrés absolus, le rendement lumineux du platine est 2,37 fois plus grand que celui du corps noir; à la température de fusion du platine, soit à 2.050 degrés absolus, il serait 2,89 fois supérieur à celui du corps noir.

Dans une même flamme, obscure, mais chaude, il y aura donc avantage à maintenir un corps coloré, ayant les propriétés du platine, plutôt qu'un corps noir comme le charbon. Car le corps coloré, rayonnant moins de chaleur, pourra, dans la même flamme, rester plus chaud, et, finalement, *émettre plus de lumière — non pas que le corps noir, s'il était à la*

*même température — mais que le corps noir s'il était dans la même flamme.*

L'éclairage par radiateurs colorés a reçu une application industrielle éclatante dans une invention qui est venue révolutionner l'industrie de l'éclairage par le gaz, et qui l'a sauvée au moment où l'on pouvait penser qu'elle allait être détrônée par l'éclairage électrique. Il s'agit du bec Auer. Le manchon Auer, formé d'un mélange approprié de 98,7 °/ₒ d'oxyde de thorium et 1,3 °/ₒ d'oxyde de cérium, a un pouvoir émissif qui, vers 1.300 degrés, augmente plus vite du côté de la partie visible du spectre, que le pouvoir émissif du platine poli à la même température : il constitue donc une source colorée plus avantageuse, au point de vue du rendement photogénique, que le platine poli, et, à plus forte raison, que le corps noir.

Un manchon Auer *continu* émettrait à 1.800 degrés, environ deux fois moins de lumière qu'un corps noir à 1.800 degrés : son pouvoir émissif relatif est supérieur à 50 °/ₒ du vert au bleu, inférieur à 50 °/ₒ du rouge au vert. Mais il émet en tout 33 fois moins d'énergie que le corps noir, parce que son pouvoir émissif est très faible dans l'infra-rouge. Le manchon Auer demandera donc 33 fois moins de calories, c'est-à-dire une dépense 33 fois moindre de gaz, que n'en exigerait un manchon noir de même surface pour ne donner que deux fois plus de lumière. Dans une même flamme, si le manchon Auer se maintient, par exemple, à une température de 1.700 degrés, un manchon noir de même surface aurait un refroidissement bien plus intense et ne pourrait se maintenir qu'à 500 ou 600 degrés, c'est-à-dire à une température où il commencerait à peine à rougir.

### § 8. — L'ÉCLAIRAGE PAR CORPS LUMINESCENTS.

Mais que l'on s'adresse à des corps noirs ou à des corps colorés, on n'obtiendra jamais une dose suffisante de rayons lumineux utiles sans porter le corps à une température minimum élevée. Tant qu'on restera au rouge, quel que soit le pouvoir émissif du corps, on ne lui fera pas émettre des rayons jaunes ou verts.

Tout autres nous apparaissent les corps *luminescents.* Ce sont des corps dans lesquels l'énergie rayonnée sous forme lumineuse est directement produite par une autre forme d'énergie que l'énergie calorifique.

Tels sont les corps *fluorescents* qui émettent une lumière différente de celle qui les frappe, et qui émettent à froid des rayons verts et jaunes sans avoir besoin d'être chauffés au-dessus du rouge ; — tels sont encore les corps *phosphorescents*, qui ne diffèrent des corps fluorescents qu'en ce que l'émission de lumière persiste après que la lumière excitatrice a cessé d'agir ; — tels encore ces tubes à gaz raréfiés où passe la décharge électrique, qui provoque des lueurs diversement colorées ; — tels ces corps qui, broyés dans l'obscurité, émettent des lueurs, comme la craie ou le sucre, et ceux qui émettent des espèces d'étincelles en cristallisant comme l'acide arsénieux ; — tels enfin les animaux photogènes, qui, sans qu'aucun point de leur organisme dépasse la température de 40 degrés, émettent des rayons lumineux visibles que les corps chauffés, noirs ou colorés, n'émettraient pas au-dessous de 1.000 degrés.

Sans attendre le jour où la phosphorescence aura reçu des applications pratiques, et où, suivant un des projets du « Bouvard » de Gustave Flaubert, les habitants

des villes seront tenus de badigeonner les façades des maisons avec du « phosphore de Bologne » qui, insolé pendant le jour, illuminera la nuit, — l'on a déjà tenté quelques applications industrielles des phénomènes de luminescence : la plus digne d'être notée est l'arc au mercure de Cooper Hewitt. Un arc jaillit entre une électrode négative de mercure et une électrode positive de fer dans un tube parfaitement vide d'air : la colonne lumineuse remplit tout le tube et n'émet guère que trois radiations dans le spectre visible, une radiation jaune orangé, une verte et une violette. Cette lampe supprime donc absolument la vision des objets rouges, et elle éclairerait mal une exposition de peinture. Mais elle paraît propre à fournir un usage excellent dans des chantiers et des ateliers : elle ne fatigue point la vue.

Ce qui est tout à fait intéressant dans le cas de cette lampe, c'est qu'elle fournit un exemple indiscutable d'un rayonnement qui n'est pas un *rayonnement purement calorifique*, au sens que donnait Kirchhoff à ce mot. A la température de l'arc au mercure, l'émission thermique du corps noir, et à plus forte raison des corps colorés non luminescents, est entièrement infrarouge et ne comprend pas de rayons lumineux visibles. L'énergie rayonnée est donc ici directement empruntée à de l'énergie électrique, c'est-à-dire à de l'énergie de qualité supérieure. Dans le cas du ver luisant et des noctiluques, l'énergie rayonnée est empruntée à une autre forme supérieure d'énergie, l'énergie chimique libre, par l'intermédiaire de cette forme transitoire et mystérieuse d'énergie que nous examinerons sous le nom d'énergie physiologique.

Ce qui est à retenir de ces essais intéressants, c'est que le problème de la lumière artificielle économique a fait un grand pas le jour où les inventeurs se sont préoccupés de réaliser artificiellement la transformation directe d'énergies de qualités supérieures en

énergie rayonnée comme lumière, sans effectuer au préalable la transformation des énergies électrique ou chimique en énergie calorifique, c'est-à-dire en une forme dégradée de l'énergie. Le progrès rationnel est venu, quand on a été hanté de l'idée fixe d'éviter ou de réduire au minimum la dégradation de l'énergie.

### § 9. — L'ÉNONCÉ CORRECT DE LA LOI DE KIRCHHOFF N'EST-IL QU'UNE TAUTOLOGIE?

Le pouvoir émissif est égal au pouvoir absorbant, pour chaque radiation et à toute température. Mais les phénomènes de luminescence nous prouvent qu'il faut introduire dans l'énoncé de la loi une condition restrictive : elle ne s'applique qu'au rayonnement émis, par un corps, noir ou coloré, quand on le chauffe. Elle ne s'applique évidemment pas au cas où la lumière est directement produite par une autre forme d'énergie : le ver luisant n'obéit pas à la loi de Kirchhoff; son pouvoir émissif pour les rayons jaunes et verts dépasse son pouvoir absorbant.

Donc la loi de Kirchhoff n'est pas applicable, d'une façon générale, aux phénomènes de luminescence. Elle ne s'applique qu'au *rayonnement purement calorifique.*

Rien n'est plus net. Mais à quoi reconnaître qu'un rayonnement est purement calorifique, sans mélange de rayons produits par luminescence?

Quand le ver luisant brille, c'est évidemment de l'énergie physiologique qui donne directement, sous une forme particulière et très avantageuse, de l'énergie lumineuse. Quand on casse du sucre dans l'obscurité, c'est l'énergie mécanique qui provoque la radiation. Lorsqu'un corps est fluorescent ou phosphorescent, la lumière qu'il émet est provoquée par une

autre lumière, et cette transformation d'une lumière en une autre est généralement accompagnée d'une diminution de fréquence, suivant une remarque du physicien anglais Stokes. Lorsqu'une flamme nous éclaire, une part de l'énergie émise peut provenir d'une transformation directe d'énergie chimique libre, bien qu'ici l'intervention d'une énergie différente de l'énergie calorifique soit moins évidente. Quel est le caractère qui nous permettra de dire avec certitude : « tel rayonnement est purement calorifique »?

Nous dirons précisément qu'une flamme ou un solide incandescent émet un rayonnement purement calorifique quand il obéit quantitativement à la loi de Kirchhoff. L'acide carbonique, chauffé, émet des rayons infra-rouges : son pouvoir émissif pour ces rayons est à celui du corps noir, pour les mêmes rayons, dans un rapport égal au pouvoir absorbant de l'acide carbonique; il satisfait ainsi à la loi de Kirchhoff, et son rayonnement est purement calorifique[1].

Au contraire la flamme jaune de l'alcool salé, souvent citée comme exemple de vérification qualitative de la loi, absorbe bien avec une intensité particulière les rayons qu'elle émet spécialement. On le prouve par l'expérience classique du renversement des raies. Mais cette flamme ne vérifie pas quantitativement la loi de Kirchhoff. Elle a pour les rayons jaunes un pouvoir émissif trop grand, et qui dépasse celui du corps noir pour les mêmes rayons. Nous déclarons, en conséquence, qu'au rayonnement purement calorifique de ce corps coloré, s'ajoute un autre rayonnement, provenant sans doute d'une transformation directe d'énergie chimique libre en énergie lumineuse.

Si nous résumons la série de ces définitions, nous arrivons à formuler les propositions suivantes :

1. Cotton. *Revue générale des Sciences*, 1899, p. 202.

En premier lieu : la loi de Kirchhoff, — égalité des pouvoirs émissif et absorbant, — s'applique à tout rayonnement purement calorifique.

En second lieu : nous appelons rayonnement purement calorifique un rayonnement auquel s'applique la loi de Kirchhoff.

Ces deux propositions, rapprochées l'une de l'autre, ne forment-elles pas une simple tautologie?

La question vaut la peine d'être examinée, car nous la retrouverons à propos de la dégradation de l'énergie chimique. Si l'on affirme, d'un côté, la transformation en chaleur de l'énergie chimique libre dans toutes les réactions où n'intervient pas d'« énergie étrangère », et que, d'autre part, l'on définisse « énergie étrangère », celle qui permet la restauration d'énergie chimique libre, ne donne-t-on pas l'impression d'une loi qu'eût pu formuler M. de La Palisse?

Sans quitter l'étude même du rayonnement, nous trouvons dans la *loi de Stokes* relative à la fluorescence, un autre exemple d'une loi, réduite, au moins en apparence, à une définition.

Cette loi veut que toute lumière homogène tombant sur un corps fluorescent ou phosphorescent ne puisse provoquer l'émission que d'une lumière de moindre fréquence vibratoire. C'est ainsi que la fluorescéine n'émet une belle lumière verte que frappée par des rayons bleus, violets et ultra-violets : les rayons jaunes et rouges ne provoquent pas sa fluorescence. Cette règle passa longtemps pour absolue. Un jour vint où l'on prétendit qu'elle souffrait des exceptions, et Lommel cita la solution alcoolique de rouge de naphtaline comme susceptible d'émettre des rayons verts en même temps que des rayons rouges, sous l'excitation de rayons jaunes.

Pour ce corps fluorescent particulier, le résultat de Lommel n'a pas été confirmé. Mais, sans aborder

d'interminables discussions de faits, on peut dire qu'aujourd'hui les physiciens ne sont plus disposés à rejeter *a priori* comme entachée d'erreur toute observation de fluorescence dérogeant à la loi de Stokes. Ils affirment seulement que, si cette loi est en défaut dans quelques circonstances, tout relèvement dans la qualité de l'énergie lumineuse a pour contre-partie certaine une dégradation compensatrice. Rien n'est plus naturel que d'admettre, dans une flamme, une dégradation d'énergie chimique.

Mais l'énoncé correct de la loi de Stokes revêt alors une forme qui apparaît encore comme une tautologie. *La transformation qualitative de la lumière que réalisent les corps fluorescents se fait toujours dans le sens où l'énergie lumineuse se dégrade — à moins d'une autre dégradation d'énergie compensatrice.* Et on déclare, *par définition*, qu'une dégradation compensatrice d'énergie chimique intervient dans toute émission de rayons fluorescents qui n'est pas conforme à la loi de Stokes.

Tous ces énoncés de lois ont donc un caractère commun ; la loi s'applique, sauf à des cas exceptionnels : dès qu'il s'agit de prévoir ces cas, l'on n'en sait donner d'autre définition rigoureuse que cette circonstance que la loi est en défaut. Et l'énoncé semble réduit à la formule : « la loi s'applique — sauf dans les cas où la loi est en défaut ».

Et, pourtant, qui ne sent qu'il y a au fond de ces énoncés quelque autre chose? S'il est malaisé d'exprimer en un langage parfaitement rigoureux la réalité qu'ils recouvrent, il n'est pas vrai que cette réalité s'évanouisse en une formule sans signification. Un exemple tout différent, qui est, lui aussi, un cas particulier de la loi de dégradation, nous permettra de faire toucher cette vérité du doigt.

Tous les corps, abandonnés à eux-mêmes, tombent.

Ils se rapprochent du centre de la terre. Cependant certains corps s'élèvent dans l'air au lieu de tomber : un ballon monte. — L'exception est peu embarrassante, car le ballon est plein d'un gaz plus léger que l'air. Et nous pourrions dire : « tous les corps tombent, s'ils sont plus lourds que l'air qu'ils déplacent ».

Encore pourrait-on répondre qu'en l'absence de méthodes, usuelles et simples, pour la mesure des densités des gaz, nous pourrions ne reconnaître la légèreté relative à l'air qu'à ce que, justement, le corps léger monte dans l'air.

Mais il y a des exceptions plus graves : l'oiseau et l'aéroplane. Quand « le plus lourd que l'air » vient à s'élever, il y a restauration d'énergie gravifique libre. Mais alors il y a dépense d'une « énergie étrangère » : celle du moteur à pétrole ou du moteur animé.

De sorte qu'en fin de compte, nous serions conduits à énoncer la loi *que les corps tombent* sous cette forme pédantesque : « Les corps tombent dans l'air, à moins qu'ils ne soient plus légers que l'air, ou qu'on ne fasse intervenir une énergie étrangère. » Plus simplement, on pourrait dire que « l'énergie potentielle gravifique se dégrade toujours et n'est restaurée que moyennant une dégradation compensatrice ». Seulement, il resterait possible d'épiloguer ; et l'on parviendrait, non seulement à discuter tous les cas imaginables d'exception, — ce qui est bien le rôle et le devoir de la science, — mais encore à masquer, sous les discussions scientifiques, le sens, pourtant clair, de la loi vulgaire. Irons-nous jusqu'à soutenir qu'en formulant cette proposition, *que les corps pesants tombent*, on énonce une simple tautologie ?

D'une façon plus générale, les phénomènes naturels comportent toujours dégradation d'énergie. Quand nous mettons la main sur quelque phénomène restaurateur d'énergie utile, nous pouvons nous tenir pour avertis par l'expérience du passé, qu'il y a quelque

part dans ce phénomène une dégradation compensatrice. Cette compensation, nous l'avons si constamment trouvée partout qu'il n'est plus téméraire de l'annoncer *a priori* dans des cas où nous ne l'avons pas encore vue.

La seule obligation qu'il ne faille pas négliger est celle qui consiste à rappeler que les lois particulières citées, sont des cas particuliers d'une loi plus générale. Lorsque, dans un cas spécial, la loi particulière présente une exception, il est moins imprudent d'affirmer que l'exception n'est qu'apparente, si la loi particulière participe à la certitude d'un des grands principes qui régissent le monde physique.

La loi de Kirchhoff, sous son énoncé correct et complet, nous révèle une propriété du pouvoir émissif des corps assez générale, pour que nous soyons en droit d'affirmer l'existence d'*autre chose* que le rayonnement calorifique, là où elle est en défaut. Mais la certitude de notre induction est singulièrement plus forte, si nous savons qu'il s'agit là d'une proposition qui est une simple conséquence du principe de la dégradation de l'énergie.

## CHAPITRE VII

## Formes inférieures de l'énergie.—III. Les chaleurs latentes de changements d'état physique.

---

### § 1. — LES CHALEURS DE FUSION ET DE VAPORISATION.

Quand la glace fond, elle emprunte de la chaleur au milieu extérieur. 1 gramme de glace a besoin, pour fondre, de prendre 80 calories. Il refroidit les corps qui l'entourent autant que le feraient 80 grammes d'eau à zéro degré qu'il faudrait échauffer d'un degré.

Cette chaleur de fusion de la glace, qui est énorme, est la raison de l'emploi de la glace comme réfrigérant. Dans la solidification de l'eau, elle se dégage, au contraire, et ralentit le refroidissement, qu'elle arrête pendant tout le temps que dure le changement d'état.

On a donné le nom de *chaleurs latentes* à ces quantités de chaleur dégagées ou absorbées dans les phénomènes de fusion ou de volatilisation. La chaleur qui est employée et réellement dépensée pour la fusion n'apparaît pas, en effet, sous la forme sensible de chaleur thermométrique ; elle est, en quelque sorte, dissimulée. Elle correspond à un changement d'agrégation des molécules qui, de l'état solide, passent au nouveau mode d'association qui caractérise l'état liquide. Elle correspond, si l'on veut, à une variation de l'énergie intérieure du corps, variation qu'elle sert précisément à mesurer.

Ce changement d'énergie, qui se manifeste par un changement de l'aspect extérieur et des propriétés du corps, est précisément une des formes les plus intéressantes de l'énergie de qualité inférieure. Il représente de l'énergie de même qualité que de la chaleur elle-même prise à la température à laquelle s'opère le changement d'état. Il est aussi facile, en élevant ou en abaissant un peu la température du milieu, de provoquer le phénomène qui absorbe de la chaleur ou de provoquer celui qui en dégage. Cette égale facilité à naître aux dépens de la chaleur, ou à disparaître, au contraire, pour se transformer en chaleur, est caractéristique de l'énergie de même qualité que la chaleur même.

La vaporisation présente un caractère nouveau, ou plutôt elle présente un caractère que présentait déjà la fusion, mais à un degré beaucoup plus marqué. Dans la vaporisation, une part de l'énergie de changement d'état sert à produire une augmentation de volume, à faire du travail extérieur. Quand 1 gramme d'eau à 100 degrés se transforme en vapeur saturée à 100 degrés, il prend un volume de 1 lit. 700, au lieu de 1 centimètre cube. La chaleur latente étant de 537 calories, 40 calories équivalent au travail nécessaire pour cette augmentation de volume, soit $\frac{1}{13}$ environ de l'ensemble de la chaleur latente.

Puisqu'il y a équilibre à la pression normale entre le liquide saturé à 100 degrés et la vapeur saturée à 100 degrés, *quand la pression est de 760 millimètres de mercure*, c'est que le passage de l'un à l'autre état est également aisé, c'est donc qu'il y a, des deux côtés, les mêmes doses d'énergies de chaque qualité. Il y a autant d'énergie utilisable dans un gramme d'eau à 100 degrés que dans un gramme de vapeur saturée à 100 degrés.

## § 2. — LE DÉPLACEMENT DE L'ÉQUILIBRE.

Supposons que nous ayons, en présence de l'eau, de la vapeur d'eau à 100 degrés, à une pression inférieure à 76 centimètres. Cette vapeur n'est pas saturée. Étant à une pression moindre, elle renferme moins d'énergie utile que le même poids de vapeur d'eau saturée à 100 degrés : donc, moins d'énergie utile que le même poids d'eau à 100 degrés. Le changement d'état ne pouvant se faire que dans le sens de la destruction d'énergie utile, ne sera possible que de l'eau à la vapeur. Dans une atmosphère de vapeur non saturée, la vaporisation est donc seule possible, non la condensation.

Supposons, au contraire, que la vapeur ait pu être amenée et maintenue à une pression supérieure à 76 centimètres, toujours à 100 degrés. La vapeur est *sursaturante*. L'atmosphère, débarrassée de poussières, contient très fréquemment de la vapeur d'eau à une dose qui peut atteindre huit fois celle qui correspondrait à la saturation : la condensation ne se produit pourtant pas jusqu'à ce que des particules solides, ou encore des corpuscules électriques, viennent fournir des noyaux autour desquels des gouttelettes se forment. Comme la vapeur sursaturante, plus comprimée, contient plus d'énergie utile que la vapeur simplement saturée, et, par suite, plus que le liquide, c'est seulement dans le sens de la condensation que pourra se faire le changement d'état : jamais on ne verra le liquide passer directement à l'état de vapeur sursaturante.

A une même température, des variations de la pression suffisent donc pour changer le sens du phénomène. A une pression inférieure à la pression de saturation, le seul phénomène possible est la vaporisation;

à une pression supérieure, c'est la condensation. Dans un cas, c'est le phénomène dégageant de la chaleur qui est possible; dans l'autre, celui qui en absorbe. Dans les deux cas, le phénomène qui se produit est celui dans lequel l'énergie se dégrade, dans lequel l'énergie utile se détruit. Le retard à l'ébullition, si bien étudié par Gernez, le retard à la condensation, étudié par le physicien et météorologiste anglais Aitken, prennent fin par des changements d'états physiques inverses l'un de l'autre, mais qui se ressemblent *en ce que tous deux comportent dégradation d'énergie.*

Nous rattachons ainsi, dans un cas particulier, au principe de la dégradation de l'énergie, la grande loi du déplacement de l'équilibre, énoncée sous sa forme générale par M. Le Chatelier. Lorsqu'il y a équilibre entre plusieurs substances chimiques prises sous divers états physiques, une augmentation de la pression provoque un changement qui diminue le volume: une diminution de la pression provoque, au contraire, une augmentation de volume. Sous cette forme, la proposition avait été énoncée, pour le cas d'un changement d'état physique, par Robin.

Dans le cas particulier de la vaporisation, nous voyons clairement qu'une augmentation de pression augmente l'énergie utile : une telle augmentation ne peut provenir que d'un travail effectué par la pression du dehors contre le système qui a dû, ainsi, diminuer de volume. Une diminution de pression diminue l'énergie utile d'une masse gazeuse, et l'équivalent de cette diminution se retrouve en travail effectué au dehors, ce qui implique une augmentation de volume du système.

Le principe n'est applicable qu'à un système en équilibre véritable, où les transformations réciproques des diverses phases de la matière sont également possibles, et — il faut ajouter — à un système en équilibre

*stable*. S'il était possible de réaliser un système où la pression d'équilibre allât croissant avec le volume, le moindre écart à l'équilibre irait s'exagérant, et le système serait instable : les corps explosifs en pourraient fournir des exemples.

De la règle de Robin, on doit rapprocher la règle de Moutier qui est un cas particulier de la loi du déplacement de l'équilibre par la température.

A une température plus élevée que celle où, pour la même pression, il y équilibre, le seul phénomène possible est celui des deux qui absorbe de la chaleur; à une température plus basse, celui qui en dégage. Comme pour le déplacement de l'équilibre par la pression, l'on pourrait, dans le cas général, rattacher le principe à la notion même d'équilibre stable, et vérifier que, toujours, le phénomène régi par la loi du déplacement de l'équilibre est celui qui entraîne dégradation d'énergie.

### § 3. — LE FROID PRODUIT PAR L'ÉVAPORATION.

Nous avons étudié, dans la détente de l'air comprimé la plus intense et, désormais, la plus usuelle des sources de froid.

Mais la vaporisation brusque donne lieu, elle aussi, à la production de froid. L'une des machines frigorifiques encore en usage est la machine à ammoniac liquide : mais on ne peut pas dire que le changement d'état y joue un rôle que rien ne pût suppléer. Cette machine est une machine à vapeur retournée, dans laquelle du travail est constamment dépensé et transformé en chaleur; moyennant cette transformation, on arrive à emprunter de la chaleur à un corps froid pour la reverser sur le milieu ambiant plus chaud. C'est la série inverse des phénomènes que présente la machine à vapeur.

Dans le cas de la production régulière du froid par une telle machine, le changement d'état lui-même n'intervient qu'à titre occasionnel et ne constitue pas la cause profonde de la possibilité de production du froid. Il n'en reste pas moins vrai que, souvent, dans la pratique, on obtient du froid, en provoquant un changement d'état et, avant tout, une vaporisation. On obtient du froid en vaporisant de l'éther, du chlorure de méthyle, — au besoin en faisant passer un courant d'air rapide à la surface de l'eau.

Que se passe-t-il dans ce cas? L'on met en contact avec le liquide à vaporiser, une atmosphère non saturée de sa vapeur, atmosphère qu'on a soin de renouveler constamment, pour éviter qu'elle ne se sature. Or, le changement d'état qui, sous la pression de saturation, peut, indifféremment, se produire dans les deux sens, obéit, si l'on vient à modifier les conditions extérieures, à la loi très générale du *déplacement de l'équilibre.*

Tout déséquilibre, cause de puissance motrice, en tendant à se combler, en produit un autre. L'un et l'autre, d'ailleurs, ne tardent pas à s'atténuer et à disparaître. Après qu'une petite masse d'éther ou de chlorure de méthyle a disparu, vaporisée dans l'atmosphère non saturée qui a passé sur le liquide, la différence de température produite un instant entre ce liquide et le milieu ambiant disparaît vite, comme s'était atténuée la différence de tension de vapeur; et l'état final qu'atteint rapidement l'atmosphère voisine est celui d'une masse homogène, où la température est uniforme, où le mélange d'air et de vapeur d'éther est, lui aussi, en proportions partout uniformes. Toute hétérogénéité tend à disparaître : une hétérogénéité, artificiellement produite, peut seulement, avant de s'évanouir elle-même, en provoquer une autre.

Ainsi, le froid permanent ne peut résulter que

d'une dégradation d'énergie renouvelée. Le froid momentané peut résulter d'un simple changement d'état physique, susceptible de se produire dans les deux sens, et qu'un déséquilibre initial aura forcé à se produire dans le sens où il absorbe de la chaleur.

# DEUXIÈME PARTIE

## LE SENS DES TRANSFORMATIONS SPONTANÉES

### CHAPITRE VIII

### L'irréversibilité et le frottement.

#### § 1. — LES PHÉNOMÈNES IRRÉVERSIBLES.

Les phénomènes naturels peuvent être classés en deux catégories : ceux que nous voyons se passer indifféremment dans un sens ou en sens inverse, et ceux que nous ne voyons jamais se produire que dans un sens.

Les premiers, à la vérité, ne se passent jamais d'une manière entièrement identique à eux-mêmes dans les deux sens. Mais on peut approcher de plus en plus de cette identité, qui est la limite commune des deux phénomènes inverses.

Le changement d'état physique est le type de ces phénomènes : quand, à zéro degré, la glace fond, nous savons bien que l'eau de fusion pourra, à l'inverse, se regeler à zéro. Sans doute, pour être sûr de fondre de la glace, il faudra la plonger dans un

milieu qui soit légèrement plus chaud que zéro degré; et, pour être sûr de congeler de l'eau, il faudra, au contraire, l'introduire dans un milieu un peu plus froid que zéro; mais ces différences peuvent être réduites à l'extrême, et nous concevons très bien que l'on arrive à réaliser la fusion de la glace et la congélation de l'eau dans des conditions de température pratiquement identiques. Nous disons que l'un quelconque de ces phénomènes est *réversible*.

De même quand nous faisons tourner un moteur électrique sous l'action d'une batterie d'accumulateurs chargée : si le couple que nous appliquons sur l'induit arrive à dépasser la valeur du couple moteur que créait le courant, nous pourrons au contraire mettre, par ce couple, le moteur électrique en rotation, et lui faire produire un courant qui servira, à son tour, à charger la batterie d'accumulateurs. La production de puissance mécanique par dépense d'électricité est un phénomène réversible, parce que, dans des circonstances tellement voisines qu'elles peuvent confiner à l'identité absolue, on peut, à l'inverse, produire de l'électricité par dépense de puissance mécanique.

Les phénomènes irréversibles, au contraire, sont ceux qui, par essence, ne sont concevables que dans un sens. Tel est le passage de chaleur, par rayonnement direct ou par conductibilité, d'un corps chaud à un corps froid. Tel est encore le frottement, destructeur d'énergie mécanique et producteur de chaleur. Tel encore le dégagement de chaleur de Joule dans les fils conducteurs que parcourt le courant électrique.

Il y a toute une classe de phénomènes irréversibles qui feront l'objet d'une étude spéciale : ce sont les phénomènes de diffusion, par où se révèle une tendance générale à l'homogène : diffusion de la matière, diffusion du mouvement, diffusion de la chaleur.

Parmi les autres phénomènes irréversibles, le plus connu est le frottement. C'est par la célèbre expérience de la fonderie de canons de Munich, que Rumford prouva que la chaleur peut être créée aux dépens de l'énergie mécanique.

### § 2. — LE FROTTEMENT EST-IL RÉDUCTIBLE A UNE COMBINAISON DE PHÉNOMÈNES RÉVERSIBLES ?

Le frottement, à vrai dire, est apparu très longtemps aux physiciens et aux mécaniciens comme une gêne et comme un inconvénient à éviter dans l'emploi industriel des machines, plutôt que comme un objet d'études véritablement intéressant. S'il a donné lieu à des mesures nombreuses, surtout de la part de Joule, à l'époque où s'élaborait le premier principe de la thermodynamique, ce n'était pas en lui-même que le frottement était étudié : c'était toujours comme procédé de transformation de travail mécanique en chaleur. Dans ces derniers temps, le frottement a donné lieu à des travaux théoriques dignes d'intérêt.

M. Duhem publiait, en 1896, sa *Théorie thermodynamique de la viscosité, du frottement et des faux équilibres chimiques*. M. Brillouin a fait paraître sur ce sujet une série de mémoires, sur lesquels j'ai appelé l'attention des physiciens qu'intéresse la philosophie des sciences, lors du Congrès international de physique de 1900.

Avant d'aborder la théorie thermodynamique du frottement, M. Duhem commence par exposer une opinion qu'il combattra, par la suite, et que M. Brillouin reprendra, sous une forme plus accessible au calcul :

« D'après cette opinion, dit M. Duhem, les équations de la mécanique où l'on fait abstraction du frottement sont entièrement générales ; mais nous les appliquons,

au cours de nos théories, à des corps trop abstraits, à des corps parfaitement rigides, parfaitement polis, tandis que les corps naturels sont plus ou moins déformables et plus ou moins rugueux : ces désaccords disparaîtraient si, au lieu d'appliquer les équations de la mécanique à des abstractions trop simplifiées, nous tenions compte des rugosités et des déformations des corps naturels. Si donc nous introduisions dans les équations de la dynamique un terme qu'elles ne renfermaient pas, ce n'est pas que nous regardions ces équations comme incomplètes ou imparfaites, c'est seulement pour tenir compte en bloc, par l'introduction d'un terme fictif, des actions variées et compliquées qui expliquent le frottement, actions dont l'analyse détaillée est impossible. »

M. Appell soutenait cette opinion dans son *Traité de Mécanique :* « Jusqu'à présent, dit-il, nous avons considéré les corps solides comme parfaitement rigides et parfaitement polis, et nous avons admis que si deux corps en repos ou en mouvement sont en contact par un point et peuvent glisser l'un sur l'autre, leur action mutuelle est normale au plan tangent commun en ce point. Cette hypothèse est contraire à l'expérience : les solides naturels ne sont ni parfaitement rigides ni parfaitement polis. Quand deux solides naturels sont en contact, le contact n'a jamais lieu en un point unique : les deux corps subissent des déformations, généralement très petites, qui les mettent en contact suivant une petite portion de surface : ces déformations, permanentes si les corps sont en équilibre, sont variables quand les corps glissent l'un sur l'autre ; il se produit alors des vibrations moléculaires et il se développe également de la chaleur et de l'électricité dont la production absorbe une partie du travail des forces motrices. On a trouvé qu'on peut introduire ces phénomènes compliqués dans le calcul, en supposant qu'à la réaction normale des deux

corps en contact se joigne une réaction tangentielle appelée *frottement.* »

C'est précisément une image simple de ces phénomènes compliqués qu'a cherchée M. Brillouin. Il rattache la production de chaleur par perte de travail moteur à la conversion en mouvement moléculaire imperceptible d'un mouvement visible. Et il rappelle très justement que la conversion de travail moteur en mouvement oscillatoire est fréquemment utilisée par les physiciens dans les laboratoires. « L'exemple le plus connu est celui de la mise en mouvement d'une aiguille aimantée par le déplacement d'un aimant tenu à la main. » Et il décrit en détail les phases de ce phénomène bien connu pour faire comprendre, à l'aide de cet exemple, le mécanisme du frottement des solides.

Si un aimant permanent est tenu dans une certaine position, avec une orientation déterminée, et qu'il se trouve, à quelque distance, une aiguille aimantée mobile, suspendue à un fil de cocon et simplement soumise à l'action terrestre ; — et si l'on vient à déplacer lentement l'aimant, en suivant un chemin quelconque, et à le ramener à son point de départ avec la même orientation, deux phénomènes très différents peuvent s'être produits :

Ou bien le chemin décrit par l'aimant reste toujours assez éloigné de l'aiguille mobile ; et alors cette dernière, déviée pendant le mouvement lent de l'aimant, revient à son orientation primitive, sans vitesse, et s'y fixe, quand l'aimant a repris lui-même sa position initiale;

Ou bien le chemin décrit lentement par l'aimant qu'on tient à la main se rapproche beaucoup de l'aiguille mobile. Celle-ci, d'abord déviée, suit les déplacements de l'aimant. Mais il peut arriver un moment où la stabilité de l'aiguille mobile, d'abord accrue et manifestée par l'extrême brièveté des oscil-

lations qu'elle effectue à droite et à gauche de sa position d'équilibre, vient à décroître, diminue de plus en plus et finit par devenir nulle. A un moment donné, l'aiguille, devenue instable, brusquement lâchée, se précipite vers une nouvelle position d'équilibre stable, plus ou moins éloignée de la première, et se met à osciller : mais cette fois, les oscillations persistent avec une amplitude notable lorsque l'aimant déviant a été ramené à sa position initiale.

Dans le premier cas, le travail moteur total provenant des forces exercées par l'aimant sur l'aiguille mobile était nul. Dans le second cas, il a une valeur variable avec le chemin parcouru, et il est égal à l'énergie du mouvement oscillatoire communiqué à l'aiguille mobile.

On peut dès lors formuler le principe suivant :

Un système mécanique, isolé, soumis à des déformations lentes et que l'on peut croire réversibles tant qu'on n'examine pas la stabilité des états d'équilibres successifs dont la succession constitue le « cycle » d'opérations, devient le siège de phénomènes irréversibles dès que le cycle comprend des états instables. C'est par un processus analogue qu'un solide poli peut agir sur les molécules superficielles d'un autre solide sur lequel il frotte, et qu'une partie du travail moteur du premier solide peut se transformer en un mouvement moléculaire oscillatoire communiqué à un certain nombre de molécules du second.

Jamais on n'était allé à ce point au cœur même du problème. Analysant minutieusement un phénomène essentiellement irréversible, M. Brillouin essaie de voir s'il ne pourrait pas être réduit à une combinaison de phénomènes séparément réversibles. Et il fournit un exemple incontestable de transformation irréversible de travail mécanique en énergie de mouvements oscillatoires, en mettant en évidence le caractère capital

de cette transformation, qui est le passage par des états d'équilibre instables.

### § 3. — LES PHÉNOMÈNES DE « FAUX ÉQUILIBRE ».

Il y a un second aspect des phénomènes de frottement et des phénomènes irréversibles en général, que M. Duhem a mis particulièrement en lumière.

Supposons qu'un solide glisse sur une pente rugueuse; il ne tombe qu'en frottant. Le frottement absorbe et transforme en chaleur une partie de l'énergie potentielle : il empêche donc l'énergie cinétique de prendre une aussi grande valeur qu'en l'absence de frottement. Il ralentit la vitesse de chute ; et le ralentissement peut être tel que la vitesse s'annule et que la chute soit purement et simplement arrêtée.

Le frottement n'a donc pas pour rôle unique de donner lieu à dégradation d'énergie : il a, en outre, pour rôle, en opposant une résistance à un mouvement qui se produirait sans lui, de le ralentir et au besoin de l'arrêter. Un corps solide immobile, retenu par le seul frottement sur une pente de montagne, sans autre force antagoniste qui contrebalance la pesanteur, n'est pas proprement en équilibre. Il est dans un état que M. Duhem a caractérisé très justement en le nommant *faux équilibre*.

Ces faux équilibres, dus au frottement de solide contre solide, jouent, dans la formation du relief terrestre, un rôle capital. La forme des terrains est souvent une forme qui n'est pas stable, et qui pourtant se conserve longtemps identique. Les talus presque verticaux, les rochers qui surplombent, abondent en pays de montagne : des forces de résistance analogues au frottement les maintiennent ainsi dans des positions de faux équilibre, qui peuvent durer, mais, —

chose importante, — qui ne peuvent pas durer indéfiniment. Un faux équilibre se distingue d'un vrai en ce qu'il ne dure pas toujours. — « Périr est leur unique affaire », disait Ramond des parois abruptes qui limitent le cirque de Gavarni.

M. Duhem a surtout étendu cette notion de faux équilibre aux phénomènes chimiques, où elle s'est montrée féconde. A basse température, certaines réactions chimiques qui devraient se faire parce qu'elles correspondraient à une dégradation d'énergie, ne se font pas, retenues et même arrêtées par un frottement chimique. A basse température, le système constitué par un simple mélange d'oxygène et d'hydrogène n'est pas un système stable : l'état stable est celui qui correspond à la combinaison de ces deux gaz à l'état d'eau. Néanmoins le mélange d'oxygène et d'hydrogène subsiste à froid. Mais que vienne une impulsion extérieure qui suffise à vaincre le frottement — une étincelle électrique traversant le mélange, un échauffement local par une flamme — et les gaz se combineront avec explosion, tout comme l'avalanche qui, pour se précipiter dans la vallée, n'attendait qu'un choc initial ou l'ébranlement d'un bruit lointain.

La considération de ces phénomènes de frottement, — frottement mécanique, frottement chimique, — nous oblige donc, en toute rigueur, à considérer non plus *deux*, mais *trois* types de phénomènes naturels. En premier lieu, il faut toujours placer les phénomènes réversibles, auxquels sont applicables les équations de la thermodynamique dans les conditions où le second principe se traduit par une égalité. En second lieu, il y a la classe immense des phénomènes irréversibles, pour lesquels le second principe de la thermodynamique se traduit par une inégalité : l'inégalité fondamentale exprimant que l'énergie se dégrade. Il y a,

en troisième lieu, non certes des phénomènes inverses pour lesquels l'inégalité fondamentale changerait de sens, mais une classe de circonstances dans lesquelles des phénomènes prévus ne se produisent pas, ou se produisent avec une lenteur telle qu'on ne les prend pas sur le vif. Le désaccord avec les règles de la Thermodynamique n'apparaît jamais, en ce sens qu'on ne voit pas se produire le contraire de ce qui est prévu ; il apparaît en ce sens, plus restreint, qu'on ne voit pas se produire tout ce qui est prévu. Pour reprendre l'exemple du rocher retenu sur la pente de la montagne, nous ne le verrons jamais de lui-même gravir la pente. Nous le verrons toujours avancer dans le sens de la chute. Mais parfois, lorsque nous devrions nous attendre à le voir tomber, nous observerons qu'il s'arrête en route.

Rien ne vient donc contredire la loi générale de la dégradation de l'énergie : le mieux que l'on puisse attendre est de trouver des phénomènes dans lesquels la dégradation est réduite au minimum, et presque à zéro : ce sont les phénomènes réversibles. Et d'un autre côté, nous trouvons, dans les phénomènes irréversibles eux-mêmes, tels que ceux dont le frottement est le type le plus simple, des moyens pratiques d'ajourner la dégradation inéluctable et de reculer une échéance à laquelle il n'est pas possible d'échapper. Mais là se borne notre espoir.

Les transformations d'énergie s'effectuent toujours dans le sens où la qualité de l'énergie se détériore, ou, tout au plus, par échange entre formes d'énergie de même qualité. Précisément cet échange entre formes d'égale qualité constitue l'essence des phénomènes réversibles. Entre énergie mécanique et énergie électrique, l'échange peut se faire indifféremment dans les deux sens. Entre énergie calorifique et énergie de changement d'état, l'échange peut encore se faire dans les deux sens. C'est entre énergies

de qualités différentes que l'échange ne peut se faire que dans le sens de la dégradation. Le phénomène irréversible entraîne toujours une dégradation d'énergie. Ainsi que le frottement mécanique, les frottements électrique et magnétique transforment en chaleur des formes supérieures d'énergie.

## CHAPITRE IX

# Frottement électrique et magnétique.

---

### § I. — LA CHALEUR DÉGAGÉE PAR LE COURANT ÉLECTRIQUE DANS LES RÉSISTANCES.

Les pertes de puissance qui limitent le rendement des machines électriques industrielles, dynamos ou moteurs électriques, se classent sous trois chefs : perte par chaleur de Joule dans les enroulements des inducteurs ou de l'induit, perte par hystérésis, perte par courants de Foucault. Autant de phénomènes irréversibles, par où quelque énergie de forme supérieure tombe sous la forme inférieure d'énergie calorifique.

Le premier est le phénomène bien connu de dégagement de chaleur dans une résistance que parcourt un courant électrique.

C'est le phénomène même qu'on utilise dans la lampe à incandescence, car il offre la possibilité de produire un dégagement de chaleur au point précis où il en est besoin. C'est celui qu'utilisent les appareils de chauffage électrique.

Susceptible d'applications occasionnelles, le phénomène n'en est pas moins gênant, en général. Il affecte les organes mêmes des machines : il impose les

conditions restrictives les plus fâcheuses dans l'établissement des lignes de jonction entre stations productrices d'électricité et stations d'utilisation ; il oblige, en effet, à ne pas dépasser pour les lignes une certaine résistance totale, et, pour cela, à prendre des fils suffisamment gros de métaux conducteurs coûteux. Le cuivre a été jusqu'à ce jour le seul pratiquement employé : des essais intéressants ont été faits pour lui substituer l'aluminium, moins bon conducteur sous le même volume, mais plus léger, et dont la conductibilité devient comparable à celle du cuivre à poids égal.

Etudié par Joule dans les fils de métaux et d'alliages, ce dégagement de chaleur se produit aussi dans les solutions conductrices du courant, comme celles dont on remplit les vases de piles et d'accumulateurs.

Il semble bien alors que le mécanisme de ce dégagement de chaleur soit le même que celui de la perte de charge dans l'écoulement d'un liquide visqueux.

Un liquide qui s'écoule dans un tube capillaire frotte sur lui-même et frotte contre les bords. Ce frottement contre la paroi devient négligeable quand le liquide mouille parfaitement comme fait l'eau pour le verre. Le frottement entre deux couches est proportionnel à la différence de leur vitesse : l'on verra, dans un instant, comment ce frottement dans un fluide visqueux réalise la diffusion du mouvement.

Avec de grandes vitesses d'écoulement, comme celles des eaux dans le lit des canaux et des rivières, les lois seraient plus complexes, et la perte de charge plus grande pour la même vitesse. Au régime des lois de Poiseuille, succéderait le régime hydraulique.

Les mêmes lois régissent l'écoulement d'un liquide à travers un tube, et l'écoulement de ce liquide

dans les interstices que laissent entre eux les innombrables grains d'une colonne filtrante de sable. Et, d'autre part, il revient au même que le liquide se meuve entre d'innombrables petits corps solides, ou qu'au contraire ce soient les petits corps solides qui se meuvent dans le liquide, telles des billes tombant dans l'eau.

Lorsque la vitesse est assez faible de part et d'autre, les mêmes lois régissent les deux cas : le frottement à vaincre est double pour une vitesse double, et la perte d'énergie mécanique, dégradée en chaleur, quadruple pour cette vitesse double.

Le physicien anglais Allen a étudié ainsi la chute de minuscules sphères solides dans l'eau, et, en même temps, l'ascension à travers l'eau de petites bulles d'air ; il a reconnu que, pourvu qu'elles soient assez petites pour ne pas descendre ou monter trop vite, le frottement qu'elles rencontrent est bien proportionnel à leur vitesse.

La chaleur mise en jeu dans ce frottement des filets fluides qui se déplacent dans un tube, ou que viennent déranger une succession de petits corps solides, n'est pas, en général, aisée à évaluer par nos instruments. Elle est réelle, et la dissipation d'énergie mécanique n'est pas douteuse.

Dans les liquides électrolytiques, tout au moins, l'analogie est manifeste entre les petites billes ou les bulles d'air d'Allen, et les fractions de molécules dissociées qui véhiculent l'électricité lorsque les liquides sont traversés par le courant. Quand une solution de sel ordinaire, c'est-à-dire de chlorure de sodium, livre passage à un courant électrique, on admet, depuis Arrhénius, qu'il existe au sein de la solution de petites particules séparées : l'ion chlore, chargé d'électricité négative, entraîné en sens inverse du courant vers l'électrode positive, et l'ion sodium, chargé d'électricité positive, qui, au contraire, des-

cend le courant. Ce qui fait que ces ions vont plus ou moins vite, c'est le plus ou moins de viscosité de l'eau dans laquelle ils se meuvent.

Et ce qui le prouve, c'est un parallélisme remarquable entre la propriété du liquide qui définit sa résistance à l'écoulement par un tube capillaire ou une colonne de sable, et la propriété du même liquide qui caractérise la résistance qu'éprouve le courant électrique à le traverser.

Vient-on à chauffer une solution plus chaude, elle devient moins visqueuse. Par là même, elle livre un plus facile passage aux ions, et devient plus conductrice de l'électricité.

Dans des conditions théoriquement plus simples, sans intervention d'aucun dissolvant distinct du corps conducteur lui-même, on a opéré sur les électrolytes amenés à l'état liquide par fusion. M. L. Poincaré a étudié le chlorure de zinc fondu, le nitrate de soude fondu ; ces corps, chauffés, deviennent de moins en moins visqueux ; exactement dans la même mesure, ils deviennent moins résistants.

Qu'on ajoute un peu de glycérine dans une solution aqueuse de sulfate de cuivre ; par là, on gêne les mouvements des ions qui transportent le courant, et l'on augmente la résistance électrique dans le même rapport que celui dans lequel on augmente la viscosité.

Dans les conducteurs métalliques, la convection de l'électricité est moins clairement apparente que dans les conducteurs liquides : on n'en attribue pas moins à des mouvements semblables d'ions ou d'électrons, cheminant entre les molécules des métaux, le passage du courant électrique à travers ces corps.

Par là, serait justifiée la comparaison que l'on a si souvent faite entre l'écoulement du courant électrique dans un câble conducteur et l'écoulement d'un fluide dans un tube, comparaison saisissante, mais à la-

quelle il serait plus correct de substituer le rapprochement entre le courant électrique dans un fil et le courant de liquide à travers une colonne filtrante de sable. C'est une comparaison sur l'utilité de laquelle on s'est d'ailleurs parfois fait illusion, parce que certaines questions d'hydrodynamique sont moins familières aux esprits et plus compliquées que les questions correspondantes d'électricité. Quoi que l'on en puisse penser, elle est justifiée par une raison profonde : elle rapproche deux des modes les plus communs par où s'opère la transformation d'une forme supérieure d'énergie en énergie calorifique.

## § 2. — LES COURANTS DE FOUCAULT.

Les courants de Foucault sont des courants électriques qui circulent dans la masse d'un conducteur métallique isolé, où aucune électrode n'amène à la manière ordinaire le courant d'aucune source. Ces courants sont produits par induction. Quand on déplace dans un champ magnétique, entre les pôles d'un électro-aimant, un fil métallique, ce fil est le siège d'un courant électrique dont le sens est tel, qu'il s'oppose au mouvement. C'est le principe de la machine dynamo. Si, au lieu d'un fil qui se rattache à un circuit général, on fait tourner dans ce champ magnétique une masse isolée, elle est le siège de courants qui tendent à l'arrêter. De fait, entre les pôles d'un électro-aimant puissant, on ne peut déplacer une lame de couteau qu'avec lenteur : une feuille de métal, glissant par sa tranche, est arrêtée dans sa chute. Que l'on vienne à continuer le mouvement, ce frottement d'un genre nouveau auquel il se heurte dégage de la chaleur. Et c'est même une méthode par laquelle Joule, et plus tard M. Violle, ont évalué l'équivalent mécanique de la chaleur.

Dans une dynamo, la masse métallique de fer doux qui forme l'induit, électriquement isolée des fils de cuivre qui s'enroulent sur elle, tourne entre les pièces polaires dans un champ magnétique intense. Elle est donc le siège de courants d'induction circulant dans la masse de l'induit lui-même, indépendamment de ceux qui naissent dans les spires du fil de cuivre ; et ceux qui sillonnent la masse de l'induit sont tout à fait inutiles, car la résistance qu'ils opposent au mouvement de cet induit ne sert à rien ; aussi s'est-on préoccupé de les supprimer, tout au moins de les limiter. De là, l'artifice qui consiste à *feuilleter* l'induit, c'est-à-dire à substituer à une masse de fer compacte une série de feuilles de tôle minces empilées, entre lesquelles s'intercalent des lamelles isolantes de mica, ou, tout au moins, que séparent les unes des autres des interruptions qui empêchent les courants de passer facilement et franchement.

Cet artifice, s'il limite les courants de Foucault, ne les supprime jamais tout à fait. Et la masse de l'induit, en tournant, s'échauffe toujours un peu. Une fraction de cet échauffement est due simplement à ce que la masse est conductrice. Mais une autre fraction tient à ses propriétés magnétiques : on lui donne le nom de *perte d'énergie par hystérésis.*

## § 3. — LE RETARD A L'AIMANTATION ET A LA DÉSAIMANTATION.

L'anneau de fer d'une dynamo, placé entre les pièces polaires, s'aimante : la position de l'aimantation reste fixe dans l'espace quand l'anneau tourne ; l'aimantation se déplace donc continuellement dans la masse de l'aimant : quand celui-ci a fait un tour complet, elle est revenue, dans l'aimant, à la même place.

Il se passe donc, à chaque tour, dans cet anneau

de fer doux, ce qui se passe dans un barreau ou dans un fil de métal magnétique qu'on a désaimanté et réaimanté, après l'avoir, dans l'intervalle, aimanté en sens inverse. Si la propriété magnétique n'éprouvait aucune résistance à s'établir ou à se supprimer dans le métal, et si elle suivait sans aucun retard les variations du champ magnétique extérieur, il n'y aurait, du fait des aimantations et désaimantations successives d'un morceau de fer, aucune perte d'énergie utile. Ce retard de l'aimantation qui ne suit pas immédiatement le champ magnétique extérieur, constitue le phénomène de l'hystérésis, qui se traduit en pratique par une dégradation d'énergie et un dégagement de chaleur à chaque cycle.

La force coercitive, l'aimantation rémanente, sont des notions déjà anciennes, que les progrès de l'électrotechnique moderne ont conduit à préciser.

Un champ magnétique faible suffit déjà pour aimanter le fer doux à saturation. Avec un champ de 10 *gauss*, c'est-à-dire d'intensité égale à environ 20 fois celle du champ magnétique terrestre qui oriente l'aiguille de la boussole, on communique déjà à un barreau de fer l'aimantation maximum qu'il puisse prendre, soit 1.300 gauss. Mais que l'on vienne à supprimer le champ qui produisait l'aimantation, à couper le courant dans la bobine enroulée autour du barreau de fer, l'aimantation ne cesse pas instantanément : il reste une aimantation rémanente, qui atteint dans le fer très doux jusqu'à 90 °/₀ de l'aimantation de saturation. Dans le fer doux, l'aimantation rémanente est considérable, mais peu stable : des chocs, des vibrations, la font presque entièrement disparaître. Dans la fonte, au contraire, et plus encore dans l'acier, l'aimantation rémanente est moindre, mais plus stable. Elle est plus stable encore dans certains composés du fer que l'on trouve dans la nature, dans la magnétite ou oxyde magné-

tique de fer, et dans les roches qui contiennent de la magnétite associée à d'autres composés. C'est à cette stabilité de l'aimantation rémanente des roches ferrugineuses, que ces roches, fréquentes dans les pays volcaniques, doivent la propriété singulière de conserver la direction d'aimantation qui était celle du champ magnétique terrestre au moment où elles se sont solidifiées. La stabilité de l'aimantation qu'elles gardent est telle qu'elles ont pu traverser, sans que cette aimantation bougeât, des milliers d'années. La direction de l'aimantation dans les dalles du temple de Mercure au sommet du Puy de Dôme, est aujourd'hui ce qu'elle était à l'époque gallo-romaine. On conçoit très bien que, si l'on oblige une propriété si stable à changer dans un corps magnétique plusieurs dizaines de fois par seconde, ces renversements rapides n'aillent pas sans une résistance analogue à un frottement et sans un dégagement de chaleur.

Dans le cas d'un fer doux que l'on aimante à saturation dans un sens, puis en sens inverse, plusieurs fois de suite, l'énergie dépensée pour l'aimantation et qui se trouve dissipée est, pour chaque *cycle* d'aimantation, de 1 millième et demi de joule par centimètre cube de fer. Cette énergie est transformée en chaleur, et donne ainsi à peu près 4 dix-millièmes de calorie au centimètre cube. 1 centimètre cube de fer pesant 7 gr. 8, et prenant 8 dixièmes de calorie pour s'échauffer d'un degré centigrade, on voit que l'énergie dissipée dans chaque cycle d'aimantation élève la température du fer d'un demi-millième de degré.

Si l'induit d'une dynamo fait 2.000 tours par minute, ce qui est une vitesse de rotation fréquemment atteinte, il subit 2.000 cycles d'aimantation, et, de ce chef, sa température s'élève de 1 degré à la minute. Si les précautions ne sont pas prises pour

que la chaleur dégagée à chaque instant puisse rayonner à l'extérieur, la chaleur dégagée par le travail d'aimantation et de désaimantation suffirait donc à porter l'induit à des températures dangereuses.

Avec la fonte et l'acier, cette chaleur dissipée dans l'aimantation serait plus notable encore. Elle atteindrait, par centimètre cube et par cycle, 3, 4 et 6 millièmes de joule. C'est pourquoi l'on prend des soins minutieux dans le choix du fer qui doit constituer l'induit et qui doit être aussi exempt que possible de charbon.

Tous les corps, solides, liquides ou gazeux, ont, à un degré plus ou moins grand, mais en général extrêmement faible, des propriétés magnétiques. Dans un champ magnétique, comme dans l'axe d'une bobine parcourue par un courant, ils prennent tous une très légère aimantation, qui, pour le bismuth, est en sens inverse du champ magnétique, et d'une intensité seulement égale au quatre-cent-millième de celle du champ lui-même. Tous les autres corps, si l'on excepte le fer, le nickel, le cobalt et les composés de ces métaux, — c'est-à-dire les corps que l'on nomme *ferromagnétiques* — ont un coefficient d'aimantation moindre encore. Mais leur aimantation ne présente que des phénomènes réversibles. Elle disparaît avec le champ qui la produit.

C'est seulement avec les corps *ferromagnétiques* que l'on voit apparaître la propriété de donner lieu à des phénomènes irréversibles. Qu'il suffise de dire que, là encore, on n'a pas renoncé à l'idée de ramener ces phénomènes irréversibles à des combinaisons de phénomènes séparément réversibles. Par ses études sur les cristaux magnétiques, la magnétite et la pyrrhotine, M. Pierre Weiss a été conduit à l'idée d'expliquer les propriétés du fer par les propriétés d'une série de petits cristaux enchevêtrés, orientés dans toutes les directions. Dans son très remarquable

essai de théorie l'on voit apparaître l'importance essentielle, signalée déjà par M. Brillouin, du passage par des états d'équilibre instables comme raison profonde de l'irréversibilité. Que de petites aiguilles aimantées mobiles, ou des molécules aimantées, aient été orientées dans une direction commune par une action extérieure : elles pourront garder après coup cette direction. Au début, elles étaient orientées dans des directions quelconques, livrées à leurs actions réciproques; le champ extérieur s'est introduit progressivement; il a commencé par ne déranger que très peu les positions des aiguilles ou des molécules, qui reprendraient leurs positions du début si le champ extérieur était alors supprimé. Mais que l'intensité de cette action extérieure augmente un peu : il viendra un moment où l'on verra quelques-unes des aiguilles chavirer et prendre une position nouvelle qu'elles garderont une fois l'action extérieure supprimée. Seulement, elles ne seront pas arrivées sans vitesse à ces positions nouvelles d'équilibre, et, en s'y précipitant, elles effectueront des oscillations. S'il s'agit de molécules, de telles oscillations se traduisent par un dégagement de chaleur. Il est aisé, par des variations du champ magnétique extérieur, de transformer du travail en énergie vibratoire moléculaire : la transformation inverse, qui consisterait à reprendre cette énergie du mouvement oscillatoire de molécules pour en extraire de l'énergie utile, est irréalisable.

# CHAPITRE X

## La tendance à l'homogène. La diffusion.

### § 1. — LA DIFFUSION DE LA MATIÈRE.

Deux gaz différents maintenus au voisinage l'un de l'autre, sans aucune cloison pour les séparer, se mélangent, et finissent, avec le temps, par constituer une masse gazeuse homogène. Je dis « avec le temps » : pour que ce mélange par simple diffusion arrive à fondre en un tout homogène de grandes masses, il lui faut, en effet, beaucoup de temps, mais l'état final est toujours l'état de mélange parfait. Le mélange d'azote et d'oxygène qui constitue l'air atmosphérique est un mélange définitif, qui présente à toute pression, à toute température, en tout lieu et à toute altitude, la même concentration en oxygène et en azote. La séparation des gaz de l'air nous serait souvent précieuse : elle ne se fait jamais spontanément dans la nature. La liquéfaction de l'air atmosphérique est un des procédés indirects les moins coûteux qui permettent de retirer de l'air l'oxygène pur.

La même chose se passe pour deux liquides miscibles. De l'eau pure, et de l'eau salée qui se trouvent au contact arrivent toujours à se mêler : si l'on ne brasse pas toute la masse liquide par des courants qui viennent briser et ployer la surface de

séparation des deux nappes, la diffusion, encore ici, sera lente; mais elle se fera. L'eau salée pénétrera peu à peu dans la nappe d'eau pure; celle-ci envahira la nappe d'eau salée où la concentration en sel augmentera d'une façon progressive à partir de la surface de séparation primitive des deux nappes.

Il n'est pas jusqu'aux solides qui, par simple contact prolongé, n'arrivent à se mêler. Walther Spring a fait, à ce sujet, une bien curieuse expérience. Il a dressé des surfaces de deux métaux, cuivre et zinc, et les a placées au contact : les surfaces planes, découpées à l'aide d'un tour de précision dans deux cylindres de cuivre et de zinc, ont été appliquées absolument fraîches, sans autre pression que celle qui résultait du poids des matières. Une élévation de la température hâtant la diffusion, on a placé le couple des cylindres dans une étuve chauffée, mais maintenue bien au-dessous du point de fusion des métaux. Après une durée de contact de quelques heures, les deux métaux se sont trouvés absolument soudés au point de ne former qu'une masse : le zinc et le cuivre s'étaient alliés et avaient formé une couche de laiton jaune de $\frac{1}{4}$ de millimètre d'épaisseur séparant le zinc blanc du cuivre rouge, et constituant, entre ces deux couleurs extrêmes, une gamme continue de teintes. Les autres couples de métaux susceptibles de s'allier entre eux : or, platine, argent, plomb, ont donné le même résultat. La matière solide est donc susceptible, comme la matière liquide et gazeuse, de pénétrer par diffusion dans une matière différente : seule, diffère la rapidité du phénomène. L'expérience célèbre de Berthollet, sur le mélange par diffusion d'acide carbonique et d'hydrogène, a réussi, entre les mains de Spring, avec le cuivre et le zinc.

### § 2. — LA DIFFUSION DU MOUVEMENT ET DE LA CHALEUR.

Ce qui se passe entre deux fluides différents se passe entre deux fluides identiques, mais animés de mouvements différents. Au lieu de couches d'azote et d'oxygène juxtaposées, nous pouvons prendre deux couches d'air, l'une immobile, l'autre entraînée par un vent régulier qui la fait glisser sur la surface de séparation. Au lieu de couches d'eau pure et d'eau salée, nous pouvons prendre deux masses d'eau, dont l'une coule d'un mouvement régulier à côté de l'autre, immobile : les courants marins, l'eau d'un fleuve qui traverse un lac, nous montrent qu'il s'agit bien là de problèmes réels.

Le fluide d'abord immobile sera entraîné peu à peu : la vitesse d'entraînement se communiquera de proche en proche à partir de la surface de séparation, tandis que les couches du fluide en mouvement seront progressivement ralenties. Le mouvement se diffusera, comme précédemment se diffusait la matière.

Nous pouvons considérer encore deux masses contiguës d'air ou d'eau, à des températures différentes. Elles tendent à se mêler pour former une masse à température uniforme ; et, en faisant abstraction même des courants de convection qui brassent les masses en présence, et qui sont l'ordinaire agent du mélange, les deux fluides chaud et froid arriveront à diffuser l'un dans l'autre, avec une vitesse d'autant plus grande qu'ils auront une plus grande conductibilité pour la chaleur.

La diffusion de la matière, la diffusion du mouvement, la diffusion de la chaleur, sont simplement trois aspects d'un même phénomène général, le phénomène de la diffusion, par où se manifeste la tendance naturelle à la réunion en un tout homogène d'une masse primitivement hétérogène.

Ces trois diffusions obéissent aux mêmes lois. Et ce n'a pas été l'un des moindres mérites de la théorie cinétique des gaz, — ou, pour prendre un terme plus général, de la théorie cinétique de la matière, — que d'avoir rendu compte de cette identité de lois, et d'avoir prédit, entre les divers coefficients caractéristiques des diverses diffusions, des relations que l'expérience a vérifiées.

On y pourrait joindre aujourd'hui un quatrième type de diffusion, celui de l'électricité. Les gaz ont une certaine conductibilité électrique : des charges électriques existant en plus grand nombre dans une portion d'une masse gazeuse, se répandent dans l'ensemble de la masse et tendent à s'y distribuer d'une manière homogène. Boltzmann a expressément étendu au calcul de la conductibilité électrique des gaz les formules obtenues dans l'étude générale de la transmission par diffusion d'une propriété quelconque.

## § 3. — LA LENTEUR DE LA DIFFUSION DANS LA NATURE.

La diffusion est toujours lente dans la nature. Prenons deux couches d'air et d'acide carbonique superposées, l'acide carbonique, plus lourd, étant au-dessous, afin que n'intervienne aucune autre cause de mélange que la diffusion. Au-dessus d'un plan de séparation, on n'avait que de l'air, au-dessous de l'acide carbonique. Si, à partir d'un instant donné, on abandonne les gaz à eux-mêmes, on trouvera que 7 secondes plus tard, le mélange contient 8 pour 100 d'acide carbonique à 2 centimètres au-dessus du plan initial de séparation et 5 pour 10.000 d'acide carbonique à 4 centimètres du même plan initial de séparation.

Ces nombres nous suffiront pour traiter pratique-

ment tous les problèmes de diffusion de ces deux gaz. Pour avoir la même concentration en acide carbonique à une distance double du plan de séparation, il faudra quatre fois plus de temps; à une distance décuple, il faudra 100 fois plus de temps. La concentration en acide carbonique sera devenue 8 pour 100 à 200 mètres du plan initial de séparation au bout d'un temps égal à 7 secondes, multiplié par 10.000 au carré, — c'est-à-dire par 100 millions, — soit au bout de vingt-deux ans. Au bout de ce même temps, la concentration en acide carbonique serait de 5 pour 10.000 à 400 mètres du plan de séparation.

La diffusion du sel marin dans l'eau donnera lieu aux mêmes remarques : les calculs étant faits une fois pour toutes pour un mélange donné, seront valables pour tout autre mélange, à condition que l'on connaisse pour les deux couples de corps le *coefficient de diffusion*. Pour l'acide carbonique dans l'air, ce coefficient est 0,14 : pour l'eau salée dans l'eau pure, il est, avec les mêmes unités, 0,000 011 6. Il est, en gros, 10.000 fois plus faible. Pour obtenir la même concentration à la même distance du plan initial de séparation, il faudra, dans le second cas, 10.000 fois plus de temps que dans le premier.

Deux nappes d'eau pure et d'eau salée étant contiguës, on rencontrerait, à 2 centimètres du plan de séparation et du côté de l'eau pure, une solution ayant 8 pour 100 de la concentration de l'eau salée, au bout d'un jour; on rencontrerait cette même concentration de 8 pour 100 à 200 mètres du plan de séparation au bout de deux cent soixante-dix mille ans.

Le même mode de calcul est applicable à la diffusion du mouvement. Le coefficient qui intervient dans ce cas est le coefficient de viscosité du fluide, divisé par sa densité. Plus un fluide sera visqueux, plus un mouvement d'entraînement s'y propagera vite et

atteindra vite la masse entière. La diffusion du mouvement sera un peu plus lente dans l'eau que dans l'air, mais les vitesses de diffusion seront comparables dans les deux milieux; car si l'air est beaucoup moins visqueux, il est aussi beaucoup moins dense.

Prenons deux masses d'air ou d'eau, l'une immobile, l'autre entraînée par un courant de 1 mètre par seconde. Avant que la vitesse ne soit devenue 8 pour 100 de la vitesse de 1 mètre, c'est-à-dire 8 centimètres par seconde, à 2 centimètres de distance du plan initial de séparation, il s'écoulera 6 secondes si l'on est dans l'air à 10 degrés, une minute si l'on est dans l'eau à 10 degrés; au bout de ce même temps, la vitesse d'entraînement sera devenue 5 pour 10.000 ou un demi-millimètre par seconde, à 4 centimètres du plan de séparation primitif. Pour que la vitesse de 8 centimètres par seconde atteigne une couche située à 200 mètres du plan de séparation, il faudrait attendre environ vingt ans dans l'air, deux cents ans dans l'eau.

L'homogénéité de l'atmosphère et des mers ne peut donc être expliquée par la diffusion seule. Et la diffusion du mouvement par viscosité n'intervient pas davantage comme cause réellement efficace du ralentissement des vents et des courants marins.

Helmholtz a calculé qu'il faudrait quarante-trois mille ans pour que la vitesse des couches supérieures de l'air fût réduite de moitié, par l'effet de la viscosité de l'air. La couche tout à fait inférieure aurait d'abord sa vitesse réduite à zéro par le frottement contre le sol; puis, de proche en proche, elle ralentirait les couches successives : le phénomène aurait bien lieu suivant le processus qui a été décrit, mais il se produirait trop lentement.

On arrive à des nombres aussi grands pour les durées nécessaires à l'égalisation des températures

par simple conductibilité calorifique. Helmholtz a trouvé qu'il faudrait trente-six mille ans pour que la conductibilité calorifique réduisît à moitié la différence de température entre les couches supérieures et inférieures de l'atmosphère. Ni la conductibilité, ni la viscosité, non plus que la diffusion simple, ne jouent donc un rôle appréciable en météorologie.

Un air qui séjourne tranquillement dans la zone des calmes équatoriaux et qui est ensuite repoussé jusqu'à 30 degrés de latitude devrait y prendre une vitesse d'ouest à l'est de 133 mètres par seconde. De même, un air au repos relatif sur le sol sur un parallèle de calme, aux environs de 30 degrés, s'il était transporté à l'équateur par un vent tel que l'alizé, y prendrait une vitesse relative d'est à l'ouest de 150 mètres par seconde. C'est à de tels nombres qu'on est conduit par l'application des idées de Ferrel sur l'influence de la rotation terrestre sur la production des vents; et c'est parce que la réalité ne nous offre, soit dans les régions équatoriales, soit dans les régions tempérées, que des vents réguliers beaucoup plus faibles, qu'Helmholtz a commencé par chercher si la simple viscosité ne pourrait pas expliquer l'écart énorme entre les vents réellement observés et les vents calculés par la formule de Ferrel. Le mécanisme par lequel les vitesses des vents d'est et d'ouest sont si considérablement réduites doit être cherché ailleurs : faute de ces remarques préliminaires, il n'est pas possible de comprendre les travaux théoriques de Teisserenc de Bort sur la circulation générale de l'atmosphère. C'est à l'occasion de ce grand problème de météorologie que s'est posée à l'esprit d'Helmholtz la question du rôle des phénomènes de diffusion dans la nature. Intéressants comme les plus simples peut-être des phénomènes irréversibles, les phénomènes de diffusion sont en

définitive loin de constituer l'agent le plus actif de la marche vers l'homogène.

### § 4. — DIFFUSION ET THÉORIE CINÉTIQUE DE LA MATIÈRE.

La diffusion présente cet intérêt exceptionnel que, phénomène irréversible, elle se prête admirablement à l'explication mécanique, qui triomphe surtout dans le domaine des phénomènes réversibles.

Pour la théorie cinétique des gaz, l'oxygène et l'azote sont des collections de petites billes très mobiles, en agitation continuelle, et parcourant, après un choc, des lignes droites jusqu'à l'instant où elles viennent heurter, ou des billes semblables, ou les parois du vase. Les chocs égalisent les vitesses d'agitation, qui sont toutes comprises entre des limites assez étroites, et varient autour d'une valeur moyenne. Imaginons qu'au-dessus d'un certain plan, nous n'ayons que de l'azote, au-dessous, que de l'oxygène. Quelques molécules de l'oxygène, dans leur mouvement continuel de va-et-vient, traverseront la surface de séparation des deux gaz, et viendront choquer des molécules d'azote; elles seront, par ces chocs, renvoyées le plus souvent vers le bas, mais aussi, parfois, de côté, de telle sorte qu'un second choc risque de les rejeter définitivement vers le haut. De même, quelques molécules d'azote, ayant d'abord traversé le plan de séparation, se trouveront, après plusieurs chocs, incorporées à la masse de l'oxygène.

Des molécules de liquide sont animées de mouvements d'agitation beaucoup plus lents : elles ne sont pas, cependant, rigoureusement immobiles; et la diffusion entre liquides s'explique exactement par le même mécanisme. Il n'est pas jusqu'aux molécules des solides eux-mêmes qui, dans une théorie cinétique générale de la matière, ne soient animées de mou-

vements d'agitation : entre des molécules de cuivre et de zinc doivent se produire, par chocs réciproques, les échanges et le mélange révélés par l'expérience de Spring.

Dans la même hypothèse cinétique, la viscosité reçoit une interprétation très simple. Au-dessus du plan de séparation, toutes les molécules possèdent, outre leur vitesse propre d'agitation, une vitesse générale d'entraînement, parallèle au plan de séparation : si les molécules du gaz immobile qui est au-dessous viennent à pénétrer au-dessus de la surface, le choc avec les molécules entraînées leur communique une partie de la vitesse d'entraînement, qu'elles apportent avec elles si elles sont rejetées dans le compartiment inférieur. De part et d'autre de la surface de séparation, s'établit donc une zone animée d'une vitesse d'entraînement intermédiaire, et qui, peu à peu, s'étend en largeur aux dépens des couches du dessus et du dessous. Le coefficient de viscosité est lié à la profondeur où peut s'enfoncer une molécule dans son mouvement d'agitation : il est proportionnel à la longueur du parcours libre moyen de la molécule gazeuse entre deux chocs; et c'est de la valeur du coefficient de viscosité que l'on déduit, par le calcul, et pour chaque gaz, la longueur du parcours libre moyen.

Le mécanisme de la transmission de chaleur par diffusion est encore le même. Si la masse du gaz qui est au-dessus du plan de séparation est plus chaude, c'est qu'elle est composée de molécules animées d'une plus grande vitesse moyenne d'agitation : entre molécules situées au-dessus et au-dessous du plan, des échanges se font encore, qui mélangent les couches; ici, les chocs réciproques égalisent les vitesses d'agitation, c'est-à-dire les températures.

### § 5. — DIFFUSION ET REVERSIBILITÉ.

Il y a pourtant, entre la diffusion de la matière dans une matière distincte, et, d'autre part, la diffusion du mouvement ou de la chaleur, une différence essentielle. Quand des molécules d'azote se sont mêlées à des molécules d'oxygène, elles n'en restent pas moins des molécules d'azote; des boules rouges jetées dans un sac de boules noires peuvent n'être pas d'un triage très aisé, mais n'en gardent pas moins leur caractère distinctif et leur individualité : et il ne sera pas déraisonnable de chercher un tamis qui arrête les unes en laissant passer les autres.

De pareils tamis existent pour les molécules gazeuses ou liquides. Ce sont les parois semi-perméables. Le platine incandescent, comme l'a montré M. Villard, est perméable à l'hydrogène, absolument imperméable à l'oxygène ou à l'azote. Il permet donc la séparation immédiate en ses constituants d'un mélange d'hydrogène et d'un autre gaz.

La membrane qui limite le protoplasma des cellules vivantes, cellules végétales, globules sanguins, a toujours la propriété d'être perméable à l'eau, et d'être imperméable à certaines substances dissoutes dans l'eau. On réalise artificiellement, quoique péniblement, des parois ayant la même propriété, se laissant traverser par l'eau pure, par exemple, jamais par le sucre de l'eau sucrée : entre un vase d'eau pure et un autre d'eau sucrée, une telle paroi *semi-perméable* laissera passer l'eau dans les deux sens, jamais le sucre. En exerçant sur elle une pression suffisante du côté de l'eau sucrée, on fera sortir de l'eau à travers la paroi, on extraira donc de l'eau d'une solution sucrée et l'on concentrera cette solution. On réalisera ainsi l'opération inverse de la diffusion.

La paroi semi-perméable permet donc, comme l'a

très bien vu M. Perrin (1), de faire de la diffusion de la matière un phénomène réversible.

Willard Gibbs avait introduit, dans la discussion des phénomènes présentés par les mélanges gazeux, une proposition qui, bien que très vraisemblable, a été longuement discutée, et qui est connue sous le nom de *postulatum de Gibbs.*

Quand on fait communiquer plusieurs réservoirs contenant des gaz différents, tous à la même pression, ces gaz se mélangent sans que la pression varie. C'est là un cas particulier de la *loi du mélange des gaz.* Ils se mélangent aussi sans que l'*énergie totale* varie. L'énergie de l'ensemble est simplement égale à la somme des énergies des diverses masses gazeuses individuelles. L'énergie du mélange d'hydrogène et d'acide carbonique qui remplit les deux ballons à la fin de l'expérience de Berthollet, est la somme de l'énergie du ballon d'hydrogène et du ballon d'acide carbonique primitivement séparés. Ce résultat n'a rien de surprenant. Mais ce qui paraît plus délicat à admettre, c'est que l'*énergie utilisable* du mélange soit, dans ces conditions, la somme pure et simple des énergies utilisables des divers gaz individuels; et, en d'autres termes, que l'*énergie utilisable ne varie pas par l'acte du mélange.* En cette affirmation consiste précisément le postulatum de Gibbs.

Il affirme que l'acte irréversible de la diffusion de la matière n'entraîne pas une dégradation d'énergie. Il implique l'idée que ce phénomène de *diffusion* n'est pas essentiellement et absolument irréversible. C'est ce qui se trouve tout à fait justifié par la découverte des parois semi-perméables qui permettent d'opérer la diffusion de la matière par voie réversible. Si l'acte de la diffusion de la matière est irréversible

(1) Rapports présentés au Congrès international de Physique réuni à Paris en 1900. T. I, p. 531.

dans les circonstances ordinaires, il existe souvent, et l'on peut toujours imaginer, un moyen pratique de le renverser sans nouvelle dépense d'énergie utilisable.

Au contraire, la diffusion du mouvement et celle de la chaleur comportent toujours une dégradation réelle, et ne se conçoivent pas comme pouvant s'effectuer en sens inverse, sans une transformation compensatrice.

Prenons deux masses gazeuses d'un kilogramme chacune, l'une animée d'une vitesse de translation d'un mètre à la seconde, l'autre immobile. L'énergie cinétique de la première est d'un demi-joule, celle de la seconde est nulle. Que le mouvement se communique de l'une à l'autre, et l'on aura, en fin de compte, une masse totale de 2 kilogrammes animée d'une vitesse d'un demi-mètre à la seconde ; la quantité de mouvement sera restée la même, mais la force vive ou l'énergie cinétique aura diminué. L'énergie cinétique totale ne sera plus qu'un huitième de joule pour chacune des deux masses, soit un quart de joule pour les deux. L'autre quart de joule n'a pu disparaître purement et simplement : il s'est transformé en chaleur. La diffusion du mouvement est donc accompagnée d'une production de chaleur aux dépens de la force vive du mouvement de translation.

Quant à la diffusion de la chaleur, elle entraîne dégradation d'énergie par le fait qu'elle substitue à une masse hétérogène au point de vue thermique une masse homogène, de laquelle on ne saurait tirer du travail. Il faudrait, pour séparer à nouveau la masse en deux portions présentant entre elles une différence de température, l'intervention des «démons» de Maxwell. Cette question soulève tout le problème du conflit entre les théories mécanistes et la loi de la dégradation de l'énergie, et nous la retrouverons quand nous aborderons l'histoire de ce conflit.

## CHAPITRE XI

# Un agent de dégradation dans la nature : le tourbillon.

---

### § 1. — LE RÉGIME HYDRAULIQUE.

Si la diffusion joue un rôle aussi effacé dans les phénomènes naturels, on est tenté de se demander : y a-t-il réellement une dégradation de l'énergie dans la nature?

On est d'autant plus excusable d'en douter que d'innombrables développements littéraires nous ont rendu familière l'idée que les transformations réciproques des forces naturelles laissent quelque chose d'inaltéré dans le monde et ne touchent pas à « l'énergie. »

Jean-Baptiste Dumas célébrait, après bien d'autres, ces « harmonies de la nature » dans le style grandiloquent qui lui était habituel. Parlant de l'équilibre qui s'établit entre l'acide carbonique de l'air et les bicarbonates de la mer, il s'écriait :

« Voilà, certes, un budget en parfait équilibre ! L'atmosphère rend à la mer tout ce qu'elle en a reçu; celle-ci lui restitue tout ce qu'elle lui a pris, et les eaux fluviales remplissent leur office d'honnête courtier, opérant *sans frais* le transport de l'acide carbonique de l'une à l'autre[1] ».

1. J.-B. Dumas. Éloge de Henri Sainte-Claire Deville. Cité dans Gay : *Lectures scientifiques*, *Physique et Chimie*, 2e édit., p. 657. (Hachette et Cie, 1906.)

Est-il donc vrai que quand les eaux fluviales ont rapporté à la mer ce que l'évaporation lui avait soustrait, tout se retrouve exactement dans le même état, et que le monde n'ait pas changé ?

L'énergie mécanique acquise par la vapeur dans son transport de la mer aux glaciers est empruntée à la radiation solaire. Quand elle retourne à la mer, l'eau venue des glaciers a perdu cette énergie mécanique, elle ne la rapporte pas avec elle. La majeure partie a été dissipée. Elle représente le travail des eaux courantes. Chaque rivière creuse son lit. S'il se produit un abaissement de l'aval du lit d'un fleuve, l'approfondissement du lit recommence, en progressant de l'aval vers l'amont.

L'énergie mécanique de l'eau qui tombe s'use donc en frottements contre le sol qu'elle attaque. N'est-ce pas un simple cas particulier du frottement des liquides et de la viscosité? Et, dès lors, est-on fondé à dire que la viscosité ne joue pas un rôle actif dans la nature?

Une expérience de laboratoire, due à M. Brillouin, permet de mettre en évidence deux régimes distincts dans l'écoulement d'un liquide dans un tuyau. Prenons une éprouvette un peu haute, 60 centimètres environ, pleine d'eau : un orifice pratiqué dans la paroi, vers la partie inférieure, est muni d'un bouchon que traverse un tube horizontal capillaire. L'eau va s'écouler en un jet parabolique. Avec une très faible hauteur d'eau dans l'éprouvette, 4 ou 5 centimètres au-dessus de l'orifice, on a un jet très régulier, lisse et transparent. Avec une très grande hauteur d'eau, on a un jet régulier encore, mais, cette fois, à parois rugueuses, et qui semble opaque. Si on laisse l'écoulement se faire à partir d'une grande hauteur, on passe d'un régime à l'autre, mais on n'y passe pas par transitions insensibles : on a, pendant un moment,

un jet dont la portée varie sans cesse entre deux limites, comme s'il hésitait entre deux positions extrêmes : il oscille entre deux régimes.

Le régime du jet lisse et transparent est le régime dit « de Poiseuille », du nom du phycisien qui a formulé les lois de l'écoulement des liquides dans les tubes capillaires. C'est le régime dans lequel l'eau qui coule par un tube de verre se subdivise en une série de tubes creux concentriques, glissant les uns sur les autres avec le frottement qui résulte de la simple diffusion du mouvement : en ce cas, la diminution de pression qui résulte de l'écoulement même, ou, comme l'on dit, la *perte de charge*, est proportionnelle à la vitesse même d'écoulement.

Le régime du jet opaque et rugueux est le « régime hydraulique » dans lequel la perte de charge est plus considérable, et varie comme le carré de la vitesse, devenant quadruple pour une vitesse double. Alors la rapidité du mouvement est trop grande pour que le régime de Poiseuille soit stable : il se produit, dans un tube, des ondulations qui font qu'une même goutte d'eau va de l'axe au bord et revient du bord à l'axe, au lieu de glisser simplement sur une ligne parallèle à l'axe : en canal ouvert, ces ondulations font place à ces mouvements tourbillonnaires autour d'une cavité centrale évasée en entonnoir, qui, dans certaines sections de cours d'eau, semblent bien se produire spontanément.

Les conditions du passage du *régime de Poiseuille* au *régime hydraulique* ont fait l'objet des travaux de M. Maurice Couette et de divers physiciens. La coexistence des deux régimes peut être réalisée dans des appareils de laboratoire : dans les cours d'eau naturels, c'est le régime hydraulique qui domine.

C'est le régime hydraulique, on le voit aisément, qui correspondra à la plus rapide destruction de force vive par frottements contre les rives et contre

le fond. Et le *tourbillon de cours d'eau*, caractéristique de ce régime, sera l'agent le plus actif de la dégradation de l'énergie mécanique dans la nature.

### § 2. — LE TRAVAIL DES EAUX COURANTES ET LA TACTIQUE DES TOURBILLONS.

Des travaux tout récents de géographie physique sont venus, précisément, mettre en lumière l'importance de la « tactique tourbillonnaire » dans le travail des eaux courantes. L'étude de marmites torrentielles aux divers stades de leur développement a éclairé la genèse de ces curieux phénomènes ; d'autre part, l'étude des gorges de vallées alpines a permis de suivre le mécanisme du creusement des roches par ces « marmites », et de montrer qu'il s'agit là d'un mode général de creusement des vallées : si la généralité n'en était pas apparue plus tôt, c'est parce que, le travail une fois terminé, l'outil est brisé : la nature est un atelier, non un musée. Enfin certaines observations, — les plus inattendues peut-être, — ont révélé la rapidité de ce travail de forage par tourbillons. Elles ont permis de rapprocher l'érosion fluviale et l'érosion glaciaire, et d'attribuer le rôle capital, dans l'action des glaciers, aux torrents sous-glaciaires, qui sont toujours de l'eau courante, et qui peuvent produire en très peu de temps une action que le glacier aura pour seul rôle de « discipliner ».

En 1897, une sécheresse exceptionnelle ayant laissé à découvert un canal de décharge au-dessous du barrage de la Maigrauge, près de Fribourg, M. Jean Brunhes remarqua qu'une marmite à section elliptique, ayant 72 et 53 centimètres comme diamètres principaux, ayant d'autre part 1 m., 21 de profondeur, avait été creusée dans la molasse calcaire qui constitue le sol du canal : or, le canal lui-même avait été

établi en 1872, et, à cette époque, le lit était parfaitement plan. Vingt-cinq ans avaient suffi pour que fût forée une marmite d'aussi grandes dimensions.

Cette observation a été le point de départ d'une série de travaux du même géographe, à la suite desquels la marmite fluviale ou glaciaire « longtemps regardée comme un fait exceptionnel et un objet de curiosité » a pris une signification toute nouvelle.

G.-K. Gilbert avait classé les marmites, suivant leur forme, en deux groupes : « La forme la plus simple est celle du tube à essai, de l'éprouvette du chimiste, cylindre légèrement évasé en haut et se terminant à la base par une coupe hémisphérique : dans l'autre forme, une bosse ou un bouton rond s'élève au centre de la coupe de base. »

L'étude minutieuse d'un îlot exceptionnellement riche en marmites, en aval de la cataracte d'Assouan, a montré à Jean Brunhes la grande généralité de cette seconde forme de marmites et lui a permis d'établir qu'elle n'est autre chose qu'un stade nécessaire, mais souvent dépassé, dans l'évolution de la cavité creusée par le tourbillon.

M. Bouquet de la Grye, à l'occasion d'un problème d'hydraulique différent, avait indiqué depuis longtemps une expérience de laboratoire qui reproduit cette forme. Si l'on fait tourner un vase cylindrique plein d'eau recouvrant une couche inférieure d'un liquide plus lourd, comme l'aniline, on a l'équivalent du mouvement tourbillonnaire n'entraînant pas le vase lui-même ; on peut même arrêter le vase brusquement dans sa rotation, et les liquides continuent à tournoyer dans une enveloppe immobile. On voit alors le centre du liquide supérieur se creuser en entonnoir, en même temps que le liquide inférieur se creuse aux bords et grimpe au centre en un monticule arrondi au sommet. On peut remplacer l'aniline

par du sable : avec des hauteurs convenables de sable et d'eau, l'on voit au centre un monticule de sable se soulever : le bord du tourbillon qui s'imprime dans le sable est donc plus creusé que le centre.

A cette élégante expérience se rattache l'explication du rôle des digues concaves employées pour approfondir le lit des rivières ensablées. Si l'on assimile le tournant même de la rivière à un grand arc de tourbillon, l'on n'est pas surpris de voir, du côté du centre de courbure, se constituer la proéminence de sable, et le bord de la rive concave au contraire se creuser plus profondément.

Ce sont de pareilles proéminences, aux fonds des marmites fluviales, qui ont été observées en nombre considérable dans l'îlot des marmites à Assouan. Telle marmite de 1 mètre de profondeur avait un monticule central de 23 centimètres de haut : les diamètres principaux de la section étant de 36 et 43 centimètres, on se rend compte combien aiguë était la pointe inférieure.

En beaucoup de cas, le monticule central était moins pointu; mais il est rare qu'on n'en ait pas trouvé trace.

A Assouan, les tourbillons sont si fréquents et si forts, et les marmites formées si voisines que les cloisons de séparation de deux marmites contiguës arrivent à être extrêmement minces; elles le sont parfois au point que, sous la seule poussée de l'eau, elles s'écroulent, laissant les marmites éventrées. L'examen des bords des cassures prouve que les cloisons ont été brusquement rompues : la roche n'est ni lisse ni noire, comme elle l'est au bord intérieur du cylindre usé par le tourbillon. On trouve à la cassure la paroi rugueuse et rouge du granit à gros grains. Or, sur cinquante de ces marmites éventrées, brisées en pleine formation, on n'en trouve aucune qui ne présente la proéminence conique au fond.

Dans des marmites sous-glaciaires, telles que celles du Gletschergarten de Lucerne, les changements de régime ayant été moins brusques que sur le Nil, les cas d'interruption du travail des tourbillons ont été plus rares, et les marmites ont pu atteindre la forme définitive, qui consiste dans l'arrachement ou l'usure de la protubérance centrale et dans l'établissement d'un fond concave. Cette forme définitive est le dernier stade, si par là on entend la perfection du type de marmite. Mais le dernier stade, à vrai dire, c'est la jonction des marmites successives par l'écroulement des cloisons qui les séparent; et c'est la formation d'une gorge de rivière, qui garde tout d'abord sur ses parois verticales la trace des marmites initiales, révélée par des surfaces cylindriques concaves et lisses, que séparent des surfaces rugueuses de cassure, comme on en voit dans toutes les *gorges* de la Suisse et de la Savoie ; plus tard enfin, ce sera l'effondrement progressif des parois elles-mêmes, et leur remplacement par des talus à pente variable, en un mot la création d'une vallée ordinaire de pays de montagne, d'où toute trace des tourbillons qui l'ont creusée a disparu.

Lorsqu'une ligne de chemin de fer est terminée, prête à l'exploitation, les jalons qui ont servi au nivellement disparaissent, et de même les voies auxiliaires par où avaient été conduits sur place les matériaux. Pour les retrouver après coup et reconstituer la manière dont le chemin de fer a été construit, il faudra qu'un observateur sagace retrouve quelque part une ligne abandonnée en plein travail, et restée inachevée, — soit que quelque cataclysme ait saisi et fixé pour l'avenir un moment de la vie actuelle, — soit que l'activité s'étant retirée d'une région et l'entreprise n'ayant plus sa raison d'être, on n'ait même pas, en la délaissant, pris la peine d'enlever piquets, voies auxiliaires et outils, qui subsistent,

témoins inutiles d'un effort qui n'a pas été poursuivi.

L'outil dans le travail de forage des marmites n'est pas l'eau. Il serait plus exact de dire que l'eau est l'ouvrier. Au centre et au fond d'un grand nombre de marmites déblayées, on trouve une grosse pierre polie, où plusieurs savants ont voulu voir l'instrument du creusement de la cavité. A Lucerne, les marmites présentent presque toutes des « meules », et l'idée de la meule unique et nécessaire a si bien dominé tout l'arrangement de la série des marmites qu'il en est auxquelles on a ajouté cette « meule », indispensable, semble-t-il, au fonctionnement du « moulin » ; par un jet d'eau latéral, puissant, on la met de temps à autre en mouvement : le spectateur la voit alors frotter contre les bords et il a l'impression qu'il assiste au creusement même de la cavité.

A Assouan, c'est à peine si, sur plus de 400 marmites étudiées, on en a trouvé deux ou trois qui eussent, au fond, un galet de 4 à 5 centimètres de diamètre. Les autres ne contenaient que du sable, et du sable extrêmement fin. C'est donc avec le sable seul que les tourbillons ont creusé le granit si dur d'Assouan. La masse qui a servi au creusement n'est donc pas un bolide isolé décrivant une courbe grandiose, c'est une poussière d'émeri fine que l'eau a fait tournoyer comme un pilon dans un mortier ; les grosses pierres ne sont qu'un accessoire, soit qu'un morceau de roche ait été jeté après coup par l'eau dans le puits déjà creusé, soit, plutôt, que l'usure par la base du monticule central, par l'action ultime du tourbillon, ait détaché du fond de la marmite cette proéminence conique : mais celle-ci n'a pas plus servi au creusement de la cavité, qu'un ornement écroulé de la voûte d'une maison en ruine n'avait servi d'instrument au maçon.

### § 3. — TOURBILLONS AÉRIENS ET TOURBILLONS DE COURS D'EAU.

La portée de la conclusion relative à l'outil réellement employé pour le forage des roches est considérable. Cet outil, aux mains de tout autre ouvrier que l'eau, pourra produire des effets, sinon aussi puissants, du moins tout à fait comparables.

C'est ainsi que l'érosion tourbillonnaire éolienne joue un rôle notable dans l'établissement de la morphologie désertique, et qu'au cours des mêmes observations, en Afrique, on a été conduit à attribuer aux petits tourbillons de vent entraînant des grains de sable, une foule d'actions perforantes sur des roches dures qui, jusque-là, étaient attribuées de préférence à des altérations chimiques.

C'est la marque d'une analogie nouvelle entre le tourbillon d'eaux courantes et le tourbillon aérien. Cette analogie nous a suggéré l'idée d'examiner, dans les deux hémisphères, le sens de rotation des tourbillons de rivières. Entre le tout petit tourbillon de vent qui marque son empreinte sur une dune de sable et le cyclone tropical, il y a tous les intermédiaires, en passant par la trombe saharienne observée si souvent par M. Teisserenc de Bort, et la tornade de nos régions, telle que celle que j'ai eu l'occasion d'examiner à Javaugues en 1902, couchant des arbres dont les troncs jonchaient le sol sur une largeur de 2 à 3 kilomètres et y dessinaient le mouvement giratoire en sens inverse des aiguilles d'une montre, avec la distinction extrêmement nette du bord maniable et du bord dangereux.

L'influence de la rotation terrestre, qui intervient pour imposer un sens de rotation à l'exclusion de l'autre, aux cyclones et tornades, est d'autant plus dominante que la durée de rotation des particules

d'air autour de l'axe central est plus grande : avec de petits tourbillons rapides, cette influence est de plus en plus incertaine. Mais elle est encore manifeste sur des tourbillons aussi rapides que le sont les tourbillons ordinaires d'eaux courantes : et les observations de Jean Brunhes et de ses élèves ont mis en lumière, dans l'Europe centrale, une incontestable prédominance des tourbillons d'eaux courantes tournant dans le sens des cyclones de nos régions. Des observations entreprises à Madagascar sous la direction du général Galliéni et du commandant Dubois ont établi que, tout au moins dans le sud de l'île, c'est l'autre sens de rotation, celui des aiguilles d'une montre, qui prédomine.

L'intérêt de ces observations est double. Elles permettent de donner une interprétation nouvelle et beaucoup plus rationnelle de la « loi de Baer », qui affirme la tendance des fleuves de l'hémisphère nord à incliner vers leur droite, et qui attribue cette tendance à la rotation terrestre. Les forces directement mises en jeu par la rotation de la terre seraient beaucoup trop faibles pour exercer une influence directe : mais il n'est plus absurde d'attribuer une action de cet ordre à la prédominance d'un sens de tourbillons sur l'autre, cette prédominance étant elle-même une conséquence indirecte de la rotation terrestre : la rotation interviendrait ici non pour agir, mais pour orienter une action. La généralité de la tactique tourbillonnaire rend, par ailleurs, légitime une explication d'une propriété générale des vallées par une propriété générale des tourbillons.

Ces observations nous révèlent en outre un caractère du tourbillon d'eau qui a échappé à bien des savants. Ce ne sont pas, avant tout, des phénomènes accidentels, nés du heurt d'un courant liquide contre une rive qu'il frôle ou contre une pile de pont : s'il fallait voir dans ces circonstances la cause fondamen-

tale des tourbillons de rivière, on en devrait rencontrer en égal nombre qui tournent dans les deux sens. Le tourbillon d'eaux courantes est quelque chose de plus spontané : il lui faut sans doute une occasion et, en quelque sorte, un prétexte, pour naître ; mais dans des circonstances qui restent encore imparfaitement précisées, il se produit au milieu du lit des cours d'eau. Et il doit se produire, en effet, puisque c'est par lui et par son intermédiaire que s'opère pratiquement la dégradation de l'énergie mécanique de l'eau courante.

### § 4. — LE « VORTEX » IDÉAL ET LES TOURBILLONS RÉELS.

Ce rôle capital dans la dégradation de l'énergie mécanique sépare nettement les tourbillons réels du tourbillon idéal, du « vortex », qui a donné lieu à tant de travaux théoriques et auquel pense, plus ou moins vaguement, quiconque entend parler de tourbillon.

Le tourbillon idéal, étudié par Helmholtz, par lord Kelvin, est constitué par des particules tournant toutes autour d'une ligne, droite ou courbe, qui est l'*axe* du tourbillon, et animées d'une vitesse angulaire qui diminue à mesure qu'on s'éloigne de l'axe : sur l'axe lui-même, la vitesse angulaire devient infinie. De tels tourbillons sont réalisés avec une perfection suffisante par des anneaux de fumée, comme ceux qui s'échappent de la pipe d'un fumeur, ou ceux que projette dans les airs un canon de tir contre la grêle. Quand l'axe autour duquel tournent les particules est, en effet, une courbe fermée, on a un *anneau-tourbillon*. S'ils existent dans un fluide totalement dénué de viscosité, des anneaux-tourbillons sont indestructibles ; ils peuvent bien se déprimer et se transporter, mais sans se couper et sans que leur intensité de circulation éprouve une variation. De là

l'idée originale qui a consisté à bâtir les atomes des corps simples, — regardés comme immuables, — sur le plan d'anneaux-tourbillons, distincts les uns des autres par la valeur de leur circulation, et à formuler l'hypothèse des *atomes-tourbillons*.

Dans les fluides sans viscosité aucune, un vortex persisterait toujours, une fois né ; mais il ne naîtrait jamais. C'est à la faveur de la viscosité, si légère soit-elle, d'un fluide réel, qu'un tourbillon peut naître et mourir. La viscosité doit donc altérer, d'une manière importante, les propriétés caractéristiques du tourbillon. Par exemple, il est impossible que, dans un liquide ou un gaz réel, la vitesse angulaire de tourbillonnement autour de l'axe devienne infinie quand on atteint cet axe lui-même. De fait, dans les tourbillons aériens tels que les tornades et les trombes, il y a comme deux tourbillons concentriques emboîtés l'un dans l'autre : l'un théorique, un « vortex », qui fonctionne comme une couronne sertissant l'autre et où la vitesse va diminuant de l'intérieur vers l'extérieur ; et un autre, central, auquel on peut maintenir le nom de tourbillon, mais où les particules fluides tournent d'un bloc, comme ferait une meule de moulin.

Si, dans les tourbillons aériens, cette partie centrale du tourbillon est souvent la moins importante des deux, il arrive, au contraire, que dans les tourbillons de rivière, cette meule centrale qui tourne tout d'une pièce soit assez importante pour constituer pratiquement tout le tourbillon.

Quelle que soit, dans un tourbillon réel, l'importance relative de ces deux éléments, certaines de leurs propriétés restent sensiblement les mêmes : démontrées par le calcul pour le vortex, elles s'appliquent aux tourbillons d'air ou d'eau qui sont plus complexes, lors même que la meule intérieure y devient prépondérante. Pour prendre un exemple, on

peut chercher dans quelle mesure les lois d'attraction et de répulsion réciproques entre vortex s'appliqueront aux cyclones des régions tropicales ou tempérées.

Mais ce qui met un abîme entre le tourbillon réel, quel qu'il soit, et le tourbillon idéal, c'est la propriété qu'a le premier de pouvoir se créer et se détruire; et, comme c'est par là que se dissipe l'énergie mécanique, on voit que le tourbillon idéal ne présente pas un intérêt spécial au point de vue qui nous occupe. Et au contraire, ce n'est que dans la mesure où il s'écarte du type idéal que le tourbillon réel permet la dégradation de l'énergie.

Pour faire comprendre la puissance singulière des tourbillons de cours d'eaux, nous pouvons même, pour simplifier notre exposition, imaginer que l'écorce extérieure formée par le tourbillon idéal soit amincie à l'extrême et que nous n'ayons plus au centre que la meule liquide tournant tout d'une pièce. Ce n'est pas là certainement la forme initiale du tourbillon d'eaux courantes, mais c'est la forme finale vers laquelle il tend quand il commence à être localisé et emprisonné dans la cavité qu'il creuse.

Une comparaison, — à laquelle il ne faut pas demander une rigueur extrême, — fera bien comprendre cette multiplication de l'action érosive. Nous avons assimilé, précédemment, un coude de rivière et un arc de tourbillon. Imaginons un fleuve coulant dans un canal rectiligne de section rectangulaire, et brusquement arrêté par un coude. A l'un des bords, la paroi tourne court pour se diriger en sens inverse, comme, sur nos vieilles routes, à certains tournants dangereux; tandis que sur l'autre bord, les deux directions successives se raccordent par une demi-circonférence ayant pour rayon la largeur de la route. Une escouade d'infanterie en marche change de direction en arrivant au tournant: elle tourne autour de l'homme

qui est au bord intérieur comme pivot ; l'homme qui est au bord extérieur double sa vitesse, tandis que celui qui est exactement au milieu de la route conserve en tournant sa vitesse primitive. C'est à peu près ce qui se passera pour notre fleuve, dont le lit change brusquement de direction. Sur l'un des bords du tournant, la vitesse sera presque nulle ; sur l'autre, à peu près double de la vitesse normale. La force vive par litre d'eau écoulé sera donc, au bord extérieur du tournant, le *quadruple* de ce qu'elle était en régime normal, et comme le nombre de litres débité par seconde est *double* de ce qu'il était, il en résulte que la force vive disponible par seconde, ou la *puissance* du filet d'eau au bord extrême du tournant, sera *huit fois plus grande* qu'elle ne l'était avant le tournant et qu'elle ne le sera après. Ainsi cette force vive, localisée en certains points où elle est multipliée d'une façon formidable, y donne lieu à des érosions que le courant normal serait impuissant à produire.

Si, au milieu du lit d'une rivière, un obstacle vient créer un point immobile, il se peut que ce point devienne le pivot initial d'un tourbillon, dont le rayon s'étendra plus ou moins loin, et que la distribution de la force vive aux divers points de la section de ce tourbillon se répartisse comme dans le tournant du canal précédemment envisagé. Si, en outre, ce tourbillon n'est pas encore immobilisé dans un moule créé par lui-même, il sera plus ou moins entraîné dans le sens du courant. La vitesse des particules d'eau sera donc plus grande au bord droit qu'au bord gauche, puisqu'au bord droit, avec le sens usuel de rotation, la vitesse de rotation s'ajoute à la vitesse d'entraînement. Or, on a reconnu que la partie la plus creuse du sillon annulaire qui entoure la protubérance centrale du fond des marmites, c'est-à-dire celle qui accuse le travail le plus intense du tourbillon, est presque toujours située dans le secteur de 90° compris entre les parties du

tourbillon et du trou, qui, par rapport au courant général de l'eau, marquent la droite et l'aval.

Et si nous portons notre attention sur les transformations d'énergie qui accompagnent la formation, puis la destruction, du tourbillon, nous remarquons, d'abord, une création de force vive sensible ou d'énergie cinétique aux dépens de l'énergie potentielle de l'eau courante : — la pression de l'eau et le niveau libre baissent par la production du tourbillon; — en second lieu, une inégale répartition, entre les divers points de la section du courant, de l'énergie cinétique créée aux dépens de l'énergie potentielle; — en troisième lieu enfin, une dégradation de cette énergie cinétique, partiellement transformée en chaleur, qui, pour être insensible à nos instruments, n'en est pas moins réelle, partiellement dépensée en travail moléculaire d'arrachement et d'usure des roches. Cette dernière phase du phénomène est la plus constante. Les premières, qui caractérisent la naissance du tourbillon, peuvent être plus variables : si le tourbillon est créé par le frottement de deux courants contigus, c'est de la suppression d'une discontinuité que naît la nouvelle distribution des vitesses; et la genèse comme la fin du tourbillon est marquée en tous les cas par un phénomène entraînant dégradation d'énergie.

Quand l'eau, partie de la mer, y revient après avoir traversé l'atmosphère, les glaciers et les fleuves, elle a donc gaspillé toute la puissance mécanique qu'il avait fallu dépenser pour l'élever au niveau des cimes neigeuses; et « l'honnête courtier », célébré par J.-B. Dumas, n'a pas opéré « sans frais ».

# CHAPITRE XII

## La dégradation de l'énergie chimique.

---

### § 1. — LE PRINCIPE DU « TRAVAIL MAXIMUM ».

La notion générale de dégradation d'énergie est particulièrement capable d'apporter de l'ordre et de la clarté dans les questions de chimie. M. Meslin signalait, en 1894, le défaut de coordination entre les travaux des thermochimistes et ceux des physico-chimistes, qui, s'occupant de branches voisines d'une même science, non seulement ne parlent pas la même langue, mais semblent invoquer des principes différents.

La thermochimie a provoqué des critiques, tout à fait justifiées si elles s'adressent à la forme qu'elle recevait dans l'enseignement, exagérées et injustes si elles visent le fond même des idées introduites en chimie par Berthelot, et qui, présentées plus correctement, méritent de recevoir définitivement droit de cité.

On peut, d'un mot, caractériser le malentendu qui a fait dévier toute cette discussion : Berthelot, reprenant et développant l'œuvre du chimiste danois Julius Thomsen, avait montré, en chimie, un cas spécial du principe de la dégradation de l'énergie, sans paraître soupçonner l'existence de ce principe général. Dans son *Essai de mécanique chimique*, où il

présente son « principe du travail maximum » comme *le plus original* des principes qu'il a établis en thermochimie, il se réfère aux travaux de physique qui ont établi l'équivalence de la chaleur et du travail mécanique; il cite Mayer, Colding et Joule, et, parmi leurs successeurs, Helmholtz, Clausius, Rankine et W. Thomson, déclarant que « les travaux de ces savants ont prouvé d'une manière irréfragable l'équivalence mécanique de la chaleur, c'est-à-dire la proportionnalité entre la quantité de chaleur disparue dans les machines et la quantité de travail mécanique développée simultanément[1] ».

Mais, à aucun moment, il ne paraît se douter que Clausius et Thomson ont établi aussi, à la suite de Carnot, une seconde loi qui règle le sens des transformations de l'énergie.

Et plus tard, lorsqu'on lui opposera la physicochimie moderne qui repose sur le second principe de la Thermodynamique, il discutera la légitimité de l'application de ce second principe, qu'il appellera « principe de l'entropie », sans faire jamais à ses contradicteurs cette réponse décisive : « Non seulement le principe dit du travail maximum, qui prétend nous donner le sens dans lequel se produisent les réactions chimiques, ne va pas à l'encontre du principe de la dégradation de l'énergie, qui nous apprend dans quel sens s'accomplissent les phénomènes naturels ; mais encore il n'est que l'application pure et simple à la chimie de ce principe général : application faite peut-être un peu brutalement et sans nuances, mais qui mériterait le reproche d'outrer le principe de la dégradation de l'énergie plutôt que celui de le méconnaître ».

Si l'on substituait définitivement à l'expression : principe du travail maximum, celle de *loi de la*

1. *Essai de mécanique chimique fondée sur la thermochimie*, t. I, p. 23, 1879.

*dégradation de l'énergie chimique*, que nous employons depuis plusieurs années dans notre enseignement de Thermodynamique, on mettrait, par le fait même, cette loi à l'abri des principales critiques qui ont prétendu la battre en brèche. Du même coup, on en limiterait la portée *a priori*; et l'on justifierait, par l'application d'un principe plus général et incontesté, les restrictions et les distinctions à introduire dans la pratique.

Voici comment, dans son ouvrage sur la *Mécanique chimique* (1879), Berthelot énonçait le principe du travail maximum :

« Tout changement chimique accompli sans l'intervention d'une énergie étrangère tend vers la production du corps ou du système de corps qui dégage le plus de chaleur. »

Et il rappelle la comparaison avec un ensemble de corps pesants qui tend vers une distribution où le centre de gravité soit le plus bas possible, sans pourtant y arriver que si aucun obstacle étranger ne s'y oppose.

Parmi les « énergies étrangères » qui peuvent provoquer la formation d'un système chimique moins stable, Berthelot cite : « Les agents physiques : électricité, lumière, *chaleur*, et l'énergie de désagrégation développée par la dissolution, laquelle est une conséquence indirecte de l'énergie calorifique[1] ».

Cette introduction de l'*énergie calorifique* parmi les énergies étrangères susceptibles de régénérer l'énergie chimique libre est, à coup sûr, ce qui, dans l'énoncé, a donné à la critique la prise la plus justifiée. Toute ambiguïté et toute proposition contestable disparaîtront, au contraire, si l'on recourt à la notion de dégradation compensatrice.

1. Loc. cit., t. II, p. 421.

Berthelot ajoutait d'ailleurs avec raison que le principe du travail maximum règle la possibilité des réactions, sans permettre de conclure à leur nécessité. Une réaction possible peut exiger, pour se produire, l'accomplissement préalable d'un « travail préliminaire », de même qu'un rocher reposant sur une pente de montagne y est simplement retenu par le frottement, et peut y rester fort longtemps, mais n'a besoin que d'une impulsion préalable pour rouler au bas de la pente, et en aucun cas ne peut la remonter tout seul.

Les exemples de réactions chimiques s'accomplissant d'elles-mêmes en dégageant de la chaleur sont bien les exemples les plus usuels ; et les cas de réactions se faisant dans le sens où le maximum de chaleur est dégagé, sont bien les cas les plus fréquents. 1 gramme d'hydrogène, se combinant avec 8 grammes d'oxygène, dégage 34 grandes calories et demie, pour donner de l'eau : pour former de l'eau oxygénée avec 16 grammes d'oxygène, le même gramme d'hydrogène ne dégagerait que 33 cal. 3 : c'est donc l'eau qui représente l'état chimique le plus stable. L'eau oxygénée tendra, au contraire, à se décomposer en eau et oxygène.

L'étain dégage 34 cal. 3 en formant le protoxyde $SnO$ ; et 67 cal. 9 en formant le bioxyde anhydre $SnO^2$ : ici ce sera donc, au contraire, le bioxyde qui sera le composé le plus stable, et qui tendra à se former soit à partir de l'étain métallique, soit à partir du protoxyde et de l'oxygène.

« Aucun composé endothermique, c'est-à-dire formé avec absorption de chaleur, ne se produit au contraire par l'union pure et simple des éléments, agissant en vertu de leur seule énergie[1]. »

1. Loc. cit., t. II, p. 426.

### § 2. — LA DISTINCTION ENTRE L'ÉNERGIE PROPREMENT CHIMIQUE ET L'ÉNERGIE DE CHANGEMENT D'ÉTAT.

Il y a pourtant des réactions endothermiques spontanées, c'est-à-dire se faisant d'elles-mêmes dans le sens de la production du froid : tels les mélanges réfrigérants. La glace pilée et le sel marin, mélangés, peuvent abaisser la température jusqu'à 23 degrés au-dessous de zéro, C'est dans la discussion de ce type de réactions que Berthelot a introduit la distinction entre les énergies chimiques, nécessairement transformées en chaleur dans les phénomènes spontanés, et les énergies de changements d'état physiques, qui peuvent donner lieu à un échange dans l'un ou l'autre des deux sens possibles. Il suffira que le phénomène purement chimique soit exothermique, l'ensemble des phénomènes pouvant se traduire par une absorption de chaleur.

Cette distinction entre deux espèces d'énergies, dont il faut faire deux comptes séparés : énergie de la réaction proprement chimique, d'une part ; énergies de changements d'état physiques, fusion, dissolution, vaporisation, d'autre part, est une des choses qui ont le plus violemment scandalisé : depuis Sainte-Claire Deville et la découverte de la dissociation, on n'admet plus, en effet, qu'il y ait une barrière infranchissable entre la physique et la chimie.

*Nous pensons au contraire que cette distinction est tout à fait justifiée.* Elle est fondée sur le fait que l'énergie chimique libre est de l'énergie de qualité supérieure qui, comme l'énergie mécanique ou électrique, a tendance à se dégrader, tandis que les chaleurs latentes de changements d'état sont des formes inférieures d'énergie comme la chaleur thermométrique.

Et voici sous quelle forme nous énonçons la *loi de dégradation de l'énergie chimique :*

Comme tous les phénomènes naturels, les phénomènes chimiques s'accomplissent dans le sens qui entraîne transformation d'énergie de qualité supérieure en énergie calorifique. L'énergie chimique que représentent des corps susceptibles de se combiner, ou des corps explosifs, est, en grande partie, de l'énergie de qualité supérieure, ou, suivant l'expression créée par Helmholtz, *de l'énergie libre*; sa transformation en chaleur est un phénomène destructeur de puissance motrice, par conséquent spontané.

Une réaction chimique restauratrice d'énergie libre est, par contre, une transformation artificielle, qui ne peut être produite que moyennant la dépense d'une autre énergie de qualité supérieure ou, plus généralement, moyennant une dégradation d'énergie au moins équivalente.

Par là se trouvent justifiées, d'une part, l'introduction de « l'énergie étrangère », et, d'autre part, la distinction entre deux fractions de l'énergie de la réaction : l'énergie de qualité supérieure qui doit se dégrader et se transformer en chaleur; et l'énergie de qualité inférieure, qu'il faut défalquer au préalable de l'énergie totale pour connaître celle qui, seule, influe sur le sens de la réaction.

La distinction de ces deux fractions de l'énergie reste délicate en fait. Elle est désormais justifiée en droit. Helmholtz l'a bien introduite dans sa *Thermodynamique des phénomènes chimiques*, et a fondé sur elle sa théorie thermodynamique de la pile voltaïque. Mais il semble qu'on ait surtout voulu voir en quoi cette considération de « l'énergie libre » des réactions chimiques s'opposait aux idées thermochimiques de Berthelot, au lieu de chercher si l'introduction de cette différence entre « énergie libre » et « énergie liée » n'allait pas justifier au contraire des distinc-

tions, en apparence subtiles, que Berthelot avait faites, guidé par un sens profond de la chimie, sans pouvoir en donner toujours de justification théorique satisfaisante. Enoncée dans le langage moderne, l'idée essentielle de Berthelot est que *l'énergie chimique proprement dite est toujours de l'énergie libre*. Même en faisant le départ de toutes les énergies de changement d'état, il ne semble pas qu'on puisse regarder un tel énoncé comme présentant une parfaite rigueur. Seulement la question est de savoir si, même simplement approchée, une loi qui répond à une idée concrète, et susceptible d'orienter les recherches, n'est pas pratiquement préférable à une loi énoncée en langage entièrement correct, sous une forme peu accessible à l'esprit.

### § 3. — LES RÉACTIONS QUI COMPORTENT DÉGAGEMENT DE GAZ A PARTIR DE SOLIDES.

Un des élèves de Berthelot qui ont le mieux compris son œuvre, M. Matignon, a, dans une série de leçons au Collège de France, fait une étude détaillée de deux types très généraux de réactions chimiques dans lesquelles la distinction de l'énergie libre, « purement chimique », et de l'énergie de qualité inférieure, est exceptionnellement nette.

Supposons qu'un groupe de solides, en réagissant, donne d'autres solides, et un liquide. Dans quel sens la réaction aura-t-elle lieu? La mise en liberté du liquide aura lieu si cette réaction dégage de la chaleur, ou encore *si elle absorbe de la chaleur, mais moins que la chaleur de fusion du liquide*. Il faut, comme disait Berthelot, *supposer ramenés tous les corps à l'état solide* : si la réaction est, dans ces conditions, exothermique, elle se fait; qu'après coup, on superpose à la réaction un changement d'état physique qui absorbe de la chaleur, ce phénomène étant possible

dans les deux sens, peu importe : ce qui intéresse le chimiste, c'est uniquement la chaleur de réaction, déduction faite de cette chaleur latente.

Les mêmes principes règlent les réactions où, d'un ensemble de solides, sortent d'autres solides et un gaz. S'il se dégage du gaz carbonique à partir du calcaire, — ou de l'oxygène à partir du chlorate ou du perchlorate de potasse, — on peut concevoir que la réaction se fait en deux temps : séparation chimique du corps gazeux, supposé à l'état solide, d'avec le reste du composé, et ensuite changement d'état de ce corps, qui l'amène de l'état solide à l'état gazeux. Il faudra, pour produire le phénomène, deux quantités de chaleur distinctes : une chaleur de décomposition, et une chaleur de sublimation.

Or, cette chaleur de sublimation, — c'est-à-dire chaleur nécessaire pour le passage direct de l'état solide à l'état gazeux, — peut se calculer pour un corps dont les propriétés sont connues : pratiquement, elle est la somme de la chaleur de fusion et de la chaleur de vaporisation. Elle est, par exemple, pour l'oxygène, de 3 calories par poids moléculaire de 32 grammes, pour l'azote, de 2 cal. 36 pour un poids moléculaire de 28 grammes. Retranchée de la chaleur totale mise en jeu dans la réaction chimique, elle donne par différence la valeur de la chaleur propre à la décomposition chimique ; et c'est le signe de cette chaleur qui, seul, déterminera le sens de la réaction.

Pour que la réaction se fasse dans le sens du dégagement gazeux, il n'est pas nécessaire qu'elle dégage, au total, de la chaleur : il suffit que, si elle en absorbe, elle en absorbe une dose inférieure à la chaleur de sublimation du gaz.

Pour que le gaz, inversement, puisse se fixer sur le solide, il ne suffit pas que cette fixation dégage de la chaleur : il faut qu'elle dégage plus de chaleur que la simple solidification du gaz.

Mais ici s'introduit une complication qui jette un jour singulier sur les réactions de dissociation. A la température de la réaction par laquelle se fixe un gaz, — soit de l'acide carbonique, — l'acide carbonique solide, s'il existait, aurait une tension de vapeur définie, — soit 20 atmosphères par exemple. C'est la fixation de ce gaz pris à l'état de vapeur saturée à 20 atmosphères, qui dégagera la chaleur latente de sublimation.

Mais si l'on prenait du gaz carbonique à une pression moindre que 20 atmosphères, il faudrait, au préalable, le comprimer à 20 atmosphères; il faudrait, pour cela, lui fournir du travail mécanique; et si l'on était parti de trop bas, c'est-à-dire d'une pression trop faible, ce travail, qu'il faut bien prendre quelque part, arriverait à absorber et au delà l'énergie libre de la réaction chimique proprement dite. Et comme le travail à dépenser pour comprimer, à température constante, un gaz depuis une pression infiniment faible jusqu'à une pression finie, *est toujours infini*, on peut être sûr que, si on part du vide, le travail sera supérieur à l'énergie libre de la réaction, quelque grande soit-elle : en d'autres termes, la réaction de fixation du gaz sur le solide sera impossible. Par conséquent, si l'on fait le vide au-dessus du composé, en enlevant le gaz aussitôt produit, on arrivera toujours à défaire la réaction qu'on avait faite, et à décomposer une combinaison solide pourtant exothermique. Dans cette dissociation endothermique, il y a toujours dégradation d'énergie, comme dans la vaporisation d'un liquide dans le vide. La réaction, à chaque température, sera réversible pour une pression de gaz telle, que le travail de détente entre la tension de vapeur du solide à cette température et cette pression, soit exactement équivalent à l'énergie libre de la réaction chimique.

L'expérience seule peut vérifier qu'en prenant *a*

*priori* comme énergie libre l'énergie mise en jeu dans la réaction proprement chimique, on ne commet pas une erreur notable. Elle justifie, en effet, pratiquement cette conception.

Par là se conçoit l'action de la chaleur sur les décompositions. La pression d'équilibre, là où la combinaison est possible, s'élève avec la température ; avec la température, s'accroît donc l'écart entre cette pression d'équilibre et la pression ordinaire, et par là augmentent les chances d'offrir, par la détente du gaz, à l'énergie libre de la réaction de combinaison l'occasion de se dégrader.

Mais ce serait méconnaître absolument la différenciation des qualités de l'énergie que de dire que la chaleur, à la température des corps réagissants, intervient « comme énergie étrangère », au même titre que l'électricité dans la charge de l'accumulateur, ou la lumière rayonnée par une source à température élevée dans la fixation du charbon par la chlorophylle. Croire, ou paraître croire, que de la chaleur purement et simplement prise à un milieu à température constante, — quelle que puisse être d'ailleurs cette température — pourrait servir à restaurer de l'énergie chimique libre, ce serait enlever toute portée à la loi de la dégradation de l'énergie chimique, et ce serait même révoquer en doute le principe de la dégradation lui-même.

Une multitude d'autres exemples justifient de même cette classification : les énergies de changements d'état physique proprement dits doivent toujours être comptées comme énergies liées ou inférieures, et dans bien des cas, on s'approche assez de la réalité en classant comme énergie supérieure tout ce qui reste après qu'on a retranché de l'énergie totale cette somme des énergies de changements d'état.

### § 4. — LES RÉACTIONS D'ÉQUILIBRE ÉCHAPPENT-ELLES AUX RÈGLES DE LA THERMOCHIMIE ?

Les phénomènes de dissociation ou d'équilibre chimique n'empêchent-ils pas, pourtant, que l'on puisse ériger en règle absolue la précédente remarque? Du moment que l'on prend sur le fait des réactions chimiques limitées, à température définie, par une réaction inverse, c'est que, semble-t-il, deux réactions exactement contraires sont susceptibles de se faire en même temps, et sont à rapprocher d'un changement d'état tel que la fusion. De ces deux réactions chimiques inverses, si l'une dégage de la chaleur, l'autre en absorbe. Et leur chaleur de réaction est assimilable à une chaleur latente.

Berthelot avait nettement conscience de cette difficulté, puisqu'il prenait soin d'exclure expressément les phénomènes de dissociation et d'équilibre des réactions auxquelles est applicable le principe du « travail maximum ». Mais cette restriction paraîtra choquante à quiconque regarde, avec raison, les réactions d'équilibre comme les plus intéressantes des réactions chimiques.

Notre sentiment actuel est que Berthelot a exagéré ici les restrictions nécessaires; que, devant les critiques adressées à sa thermochimie, et que sa méconnaissance de l'idée générale de dégradation de l'énergie rendait pour lui embarrassantes, il a ici trop reculé.

*Il n'est pas vrai que l'énergie chimique mise en jeu dans une réaction d'équilibre soit nécessairement de l'énergie de qualité inférieure comme celle d'un changement d'état physique.* Dans la fusion, la chaleur latente est bien de l'énergie de qualité inférieure. Dans la vaporisation, il y a déjà une petite fraction de l'énergie de changement d'état qui est de qualité

supérieure, puisqu'elle fait équilibre au travail de dilatation du liquide vaporisé. Dans la dissociation, l'énergie proprement chimique de décomposition peut être intégralement de l'énergie de qualité supérieure, équilibrant le travail de détente du gaz dégagé.

On a vu précisément que dans la pile, l'énergie chimique se divise en deux parts : — énergie liée, de qualité inférieure, petite fraction de l'énergie totale, apparaissant ou disparaissant en produisant du chaud ou du froid, suivant le sens de marche du courant électrique ; — énergie libre, qui est la grosse part de l'énergie chimique et qui est de même qualité que l'énergie électrique. Il y a équilibre, il y a *pile réversible*, quand on arrive à transformer en même temps l'énergie liée en chaleur, positive ou négative, et l'énergie libre en énergie électrique. En l'absence de courant électrique, l'énergie chimique libre subirait la dégradation à l'état d'énergie calorifique. Et c'est même la dégradation de cette énergie libre qui déterminerait le sens de la réaction.

Dans cet exemple qui a frappé le génie d'Helmholtz, nous arrivons précisément à faire abstraction du phénomène, qui est en général le phénomène le plus gros et celui qui crève les yeux : le dégagement de chaleur résultant de la dégradation de l'énergie libre de la réaction chimique. Il ne nous reste que le phénomène complémentaire, résiduel, du passage à l'état de chaleur, positive ou négative, de l'énergie de qualité inférieure. On a là, pratiquement réalisée, la séparation des deux qualités d'énergie, que l'intuition de Berthelot essayait souvent avec succès de séparer *a priori*, non sans y réussir presque toujours, mais sans arriver à convaincre les physiciens de la légitimité de cette séparation.

## § 5. — CONCLUSION. — LA LOI DE LA DÉGRADATION DE L'ÉNERGIE CHIMIQUE.

Pour nous résumer, l'énergie chimique se dégrade. Dans les réactions violentes et spontanées, la plus grande partie de l'énergie chimique constitue toujours de l'énergie supérieure : elle apparaît, après la réaction, sous forme de chaleur.

Pour calculer d'avance la part de cette énergie chimique qui est de l'énergie supérieure, il faut toujours défalquer au préalable la part de l'énergie de réaction qui est de l'énergie d'espèce inférieure. Dans bien des cas, il suffira de compter comme énergie inférieure celle qui est relative aux changements d'état physique qui accompagnent la réaction. En ce cas, le phénomène aura lieu dans un sens tel que la réaction purement chimique dégage de la chaleur.

L'énergie chimique libre peut être intégralement transformée en énergie mécanique, ou en énergie électrique : c'est cette dernière transformation que réalise la pile. En dehors de ces cas, où l'énergie chimique libre se dépense d'une façon réversible, elle se dégrade et passe à l'état de chaleur.

On ne pourra, par la suite, restaurer cette énergie chimique libre que moyennant une dépense égale d'énergie de qualité supérieure ou, plus généralement, moyennant une dégradation d'énergie corrélative.

Toute difficulté entre la thermochimie et la physicochimie est désormais écartée. En chimie, nous retrouvons les trois types de phénomènes naturels que nous avons décrits quand nous avons rencontré le plus simple des phénomènes irréversibles : le frottement.

Nous trouvons, en premier lieu, les *phénomènes réversibles*, qui ne comportent ni dégradation, ni res-

tauration d'énergie utile. C'est le cas-limite où l'inégalité qui exprime le principe de Carnot devient une égalité. C'est par excellence l'objet de la physicochimie. La considération trop exclusive de ces cas-limites d'égalité, qui présentent, à la vérité, un intérêt exceptionnel, a parfois empêché de voir clairement que l'inégalité est le cas général. A force de discuter des réactions d'équilibre, on a parfois méconnu le grand fait aperçu par Thomson et mis en lumière par Berthelot, que *les réactions chimiques se passent de préférence dans un sens.* On a surtout négligé de remarquer que, — contrairement à ce que laissaient entendre plusieurs physicochimistes et à ce qu'a paru concéder Berthelot lui-même, — *la réversibilité d'un phénomène n'implique pas le classement des énergies qui y entrent en jeu, dans la même catégorie que les chaleurs latentes de changements d'état.* La réversibilité résulte, non de l'équivalence de qualité entre une « chaleur de transformation » et l'énergie calorifique, mais d'un échange entre des énergies respectivement de même qualité. La réaction chimique réversible est une superposition de deux transformations d'énergie : une transformation analogue à l'échange entre énergies électrique et mécanique, et une autre comparable à l'échange entre une chaleur latente et une chaleur thermométrique. Au voisinage de l'équilibre, c'est la seconde qui donne son signe au dégagement de chaleur résultant : et la réaction peut ainsi se traduire par une production, en apparence indifférente, de chaleur ou de froid, sans qu'il faille cesser de ranger l'énergie proprement chimique qui y est en jeu dans la catégorie des formes supérieures de l'énergie.

Loin de s'opposer à la règle de Berthelot, le cas des réactions de dissociation et des réactions d'équilibre, semblables à celles qui se passent dans l'accumulateur électrique, est, en général, le cas typique d' « in-

tervention d'une énergie étrangère de qualité supérieure ». Quand cette énergie étrangère est celle d'un gaz comprimé, les phénomènes se compliquent un peu : ils se trouvent complètement éclairés par l'analyse des variations séparées de « l'énergie » et de « l'énergie utilisable » des gaz comprimés et détendus.

En second lieu, nous trouvons en chimie la classe très générale des réactions comportant une dégradation d'énergie. Quand on n'attelle pas une machine-outil à la dynamo fonctionnant comme moteur électrique, l'énergie électrique se dissipe tout entière à l'état de chaleur dans les résistances. Il en est de même pour l'énergie chimique libre quand on ne la capte pas à l'état d'énergie électrique ou mécanique. Elle se dégrade alors et tend à donner, non *le travail maximum*, mais *la chaleur maximum*. Cet emploi du mot « travail » là où il faudrait « chaleur » est particulièrement fâcheux en une circonstance où il s'agit de différencier des qualités diverses d'énergie et d'affirmer la tendance d'une qualité donnée d'énergie à tomber à une qualité inférieure. Mais la tendance est incontestable. Et la règle qui l'affirme sous une forme correcte, cesse d'être une tautologie, — tout comme la loi de Kirchhoff sur l'émission, — dès qu'elle apparaît comme un cas particulier d'un principe général : l'extension de ce principe à des cas où il n'a pas été expressément vérifié n'est que l'application pure et simple des méthodes du raisonnement inductif.

En troisième lieu, enfin, nous avons en chimie, comme en mécanique, des phénomènes dans lesquels la dégradation de l'énergie est ralentie ou arrêtée par un frottement.

L'étude systématique de ces phénomènes de « faux équilibre » a été faite d'une façon particulièrement heureuse par M. Duhem. Ils correspondent, dans le

langage de la thermochimie, aux réactions qui exigent, pour s'accomplir, un « travail préliminaire ».

Les phénomènes chimiques ne font donc pas exception aux règles qui régissent le sens de tous les phénomènes naturels. Ils s'effectuent spontanément dans le sens qui comporte une dégradation d'énergie. Dans les phénomènes chimiques, comme dans tous les autres, quelque chose se perd. L'énergie utile se détruit; et on ne la recouvre qu'en y mettant le prix.

L'application à la chimie du principe de la dégradation de l'énergie comporte seulement des distinctions et des restrictions qui en feront toujours l'un des chapitres les plus difficiles de la science de l'énergie. Si le mérite n'en est que plus grand, pour un chimiste, d'avoir eu l'intuition d'un cas particulier de la loi sans avoir eu l'idée nette de la loi générale, on accordera du moins qu'il était tout à fait absurde d'introduire dans l'enseignement élémentaire l'étude exclusive d'une des applications les plus délicates d'un principe que l'on passait systématiquement sous silence. Et il ne faut pas regretter que des attaques, parfois excessives, aient amené à refondre entièrement un exposé tout à fait défectueux. Il y avait une véritable monstruosité pédagogique à vouloir démontrer, à tout prix, en dépit des exceptions apparentes, que, dans les réactions chimiques, « quelque chose se perd » ; — et à superposer l'affirmation tenace de cette propriété singulière, à la philosophie scientifique qui, naguère encore, dominait l'enseignement sans contrepoids, et qu'imprégnait tout entière l'idée fausse que « rien ne se perd ».

## CHAPITRE XIII

# La dégradation de l'énergie dans l'être vivant.

---

### § 1. — EXISTE-T-IL UNE THERMODYNAMIQUE SPÉCIALE A L'ÊTRE VIVANT?

Robert Mayer avait su deviner que le principe de l'équivalence de la chaleur et du travail s'applique à la machine animale, la plus compliquée de toutes : ce sont ses réflexions sur l'origine du travail fourni par l'être vivant qui lui ont suggéré sa découverte immortelle. Par contre, les physiciens anglais qui ont apporté leur contribution à la Thermodynamique, et particulièrement au second principe, se sont posé la question de savoir si l'être vivant obéissait à ce second principe. Thomson, dans le mémoire célèbre où il a, pour la première fois, déduit du principe de Carnot la « tendance universelle à la dissipation de l'énergie mécanique » dans le monde, déclare qu'elle n'est que probable dans les phénomènes qui s'accomplissent dans les animaux et les végétaux. Joule exclut de ses raisonnements les « forces qui opèrent par l'intervention mystérieuse de la vie ». Plus tard, Helmholtz lui-même paraît avoir tout au moins envisagé l'hypothèse d'une restauration possible de l'énergie utilisable dans les êtres vivants.

M. Duhem a très heureusement formulé le problème

à la fin de son ouvrage sur la viscosité, le frottement et les faux équilibres chimiques.

Rappelant que le principe de Carnot et Clausius se traduit, dans le cas général, par une inégalité qui a toujours lieu dans le même sens, il fait ressortir le « caractère arbitraire que présente cette inégalité de Clausius » ; et remarque que le sens de cette inégalité n'est pas une conséquence indirecte d'hypothèses d'ordre logique. Rien ne prouve donc que la confirmation apportée jusqu'ici par l'expérience aux déductions de la thermodynamique ne puisse se changer un jour en contradiction :

« Le physicien qui, en présence de la notion de coefficient de dilatation, poserait que ce coefficient est toujours positif, verrait son hypothèse confirmée par les faits jusqu'au jour où il étudierait la dilatation de l'eau. Il est donc prudent de prévoir une thermodynamique où le sens de l'inégalité de Clausius ne serait plus fixe, où le travail de la viscosité, du frottement, pourrait être positif aussi bien que négatif.

« En une semblable thermodynamique, on pourrait rencontrer des corps qui se transformeraient dans un certain sens, alors que la thermodynamique classique annonce leur équilibre ou leur transformation en sens inverse; à basse température, des corps endothermiques pourraient prendre naissance, des corps exothermiques pourraient se décomposer, alors que la thermodynamique classique n'admettrait la possibilité de telles réactions qu'à une température très élevée; on pourrait, par exemple, voir l'acide carbonique et l'eau se transformer, à la température ordinaire, en oxygène et amidon, alors que la doctrine admise indique la modification inverse comme seule possible; un système pourrait, en une transformation isothermique, fournir un effet utile supérieur à sa perte d'énergie utilisable; *le mouvement perpétuel ne serait plus impossible.*

« Lorsqu'on analyse les propriétés des systèmes où le travail de la viscosité et du frottement ne serait plus essentiellement négatif, où les transformations non compensées ne seraient plus essentiellement positives, il est impossible de ne pas être frappé des analogies que ces propriétés présentent avec celles des tissus vivants, soit animaux, soit végétaux; de ne pas remarquer la facilité avec laquelle elles rendent compte de la plupart des synthèses organiques, inexplicables à la mécanique chimique ordinaire, irréalisables, hors de l'organisme, *dans les conditions de température où l'organisme fonctionne*.

« On est alors conduit à se demander s'il n'y a pas lieu d'appliquer aux tissus vivants une thermodynamique nouvelle; dans cette thermodynamique physiologique, le principe de la conservation de l'énergie serait conservé; mais le principe de l'impossibilité de mouvement perpétuel serait rejeté; le travail de viscosité et de frottement pourrait être positif aussi bien que négatif; la transformation non compensée pourrait être négative aussi bien que positive.

« Cette vue sur la constitution d'une thermodynamique physiologique peut sembler audacieuse. Helmholtz me paraît l'avoir indiquée; on me pardonnera d'avoir insisté sur une hypothèse émise par cet homme de génie.

« D'ailleurs, une autre interprétation des synthèses organiques accomplies à l'inverse des prévisions de la thermodynamique semble susceptible de se substituer à la précédente. On n'a d'exemples certains de semblables synthèses que celles qui se produisent au sein du protoplasme chlorophyllien soumis à l'action de la lumière; n'est-ce point cette dernière action qui doit être indiquée comme la cause du désaccord entre les faits et les prévisions de la thermodynamique? Nous avons vu la lumière diminuer la valeur absolue des termes de viscosité et de frottement; ne

pourrait-elle aller jusqu'à changer le signe de ces termes? Ne pourrait-elle produire, au sein du protoplasme chlorophyllien, des actions accompagnées d'un travail positif du frottement ou de la viscosité? Ne pourrait-elle agir de même en dehors de l'organisme, ce qui expliquerait certaines actions photographiques? L'influence de la lumière ultra-violette sur la déperdition électrique ne serait-elle pas un phénomène analogue à son influence sur la viscosité chimique? L'avenir répondra peut-être affirmativement à ces questions[1] ».

Cette page, qui date de 1896, donne, avec l'énoncé de l'hypothèse, l'argument qu'on peut lui opposer. Elle a le mérite de révéler une vue claire des conséquences d'un renversement de l'inégalité de Clausius: ce renversement équivaudrait à la possibilité du mouvement perpétuel; il est arrivé à d'autres écrivains qui se sont flattés de trouver dans d'autres phénomènes une contradiction avec le principe de la dégradation de l'énergie, de ne pas en avoir aussi nettement conscience.

Le grand fait qui domine toute la physiologie moderne est que, pris isolément, tous les phénomènes physico-chimiques dont l'être vivant est le théâtre obéissent aux lois ordinaires de la physique et de la chimie. C'est cette idée qui inspirait Berthelot lorsqu'il poursuivait la synthèse chimique des composés organiques. L'étude des solutions colloïdales qui a pris, depuis l'invention des ultramicroscopes, une si grande importance, rapproche plus étroitement encore les échanges de matière et d'énergie entre les liquides artificiels, examinés, comme on disait jadis, *in vitro*, et les échanges entre les liquides des cellules vivantes.

1. Duhem. — *Théorie thermodynamique de la viscosité.* Paris, Hermann, 1896.

On peut donc présumer, avant toute démonstration de détail, que les principes qui dominent la physique et la chimie ne seront pas mis en défaut par les faits que présente le monde vivant. Telles sont les lois de la conservation de la matière et celles de la conservation de l'énergie.

L'être vivant s'assimile des aliments; il élimine des matériaux usés; son poids peut augmenter ou diminuer: il n'est capable ni de créer de la matière ni d'en détruire. Si on barricade un animal dans une cage à parois imperméables, le poids total de la cage avec son contenu ne variera pas; si l'animal y meurt asphyxié, le poids ne cessera pas d'être invariable.

## § 2. — L'ÉNERGÉTIQUE ANIMALE.

Pour reconnaître si le principe de la conservation de l'énergie s'applique à un être animé, on s'est efforcé de le placer dans des conditions où l'énergie intérieure restât invariable. Ou mieux, on s'est arrangé pour que la machine animale subît un cycle fermé de transformations, c'est-à-dire se retrouvât au bout de quelques heures, au bout d'une journée, dans des conditions identiques aux conditions initiales : l'identité d'état d'un être vivant à une même heure, deux jours de suite, ne peut jamais être affirmée avec certitude; l'être a vieilli, d'un jour à l'autre ; mais on conçoit qu'avec un régime bien défini, on arrive à s'en rapprocher. Supposons l'identité assurée. On pourra dire que l'énergie fournie durant cette période à l'être vivant équivaut à l'énergie qu'il a lui-même communiquée à l'extérieur. L'énergie qu'il a reçue lui vient de l'alimentation : les aliments ont été brûlés par la respiration, et l'on aura la mesure de l'énergie correspondante en mesurant la chaleur de combustion de ces aliments. Si

'on ne donnait rien à manger pendant une période assez courte, l'être vivant ne cesserait pas de respirer; mais alors il brûlerait ses réserves de corps gras et de matières albuminoïdes. Pour que, d'un jour à l'autre, il ne perde pas de poids, pour qu'il ne maigrisse ni n'engraisse, pour qu'il reste identique à lui-même, il faut lui fournir une quantité exactement dosée d'aliments : ni trop, ni trop peu. Si l'on change la nature de ces aliments, les poids nécessaires pour maintenir l'état de régime varieront : le poids d'un aliment sera d'autant moindre que son pouvoir nutritif sera plus grand. C'est par des expériences de ce genre qu'Atwater et Rosa ont comparé le pouvoir d'alimentation de l'alcool à celui du sucre et des corps gras.

Si l'être vivant accomplit un travail mécanique, s'il fait tourner un treuil de carrier, ou, comme dans les expériences d'Atwater, un motocycle actionnant une dynamo, il abandonne, à l'extérieur, non seulement la chaleur qu'il rayonne à l'état normal, mais une quantité de chaleur complémentaire : il s'échauffe. Ce n'est pas, comme on est tenté de le dire parfois, le travail qu'il fait qui « se transforme en chaleur » ; tout au contraire : si les combustions intérieures par respiration restaient les mêmes quand on travaille et quand on ne travaille pas, on se refroidirait en travaillant. Mais l'expérience montre que, dans le cas où il y a travail extérieur, les combustions respiratoires augmentent au point de parer, non seulement à l'énergie fournie sous forme mécanique, mais encore à une émission complémentaire de chaleur qui s'ajoute à la chaleur normalement émise. A l'état de *régime*, il faut augmenter l'alimentation si l'on augmente le travail à produire : ceci est conforme à l'expérience la plus vulgaire.

La proportion de l'énergie fournie par l'animal

sous forme mécanique peut être considérable; elle peut atteindre la cinquième ou la sixième partie de l'énergie totale qu'il produit. Cette constatation suffit à différencier le moteur animal d'un moteur purement thermique. Si la chaleur de combustion des aliments servait à chauffer la machine animale à la façon d'une chaudière chauffée par le charbon brûlé dans le foyer, on n'en pourrait attendre qu'un rendement mécanique infime ; car il n'y a pas, dans le moteur animé, à côté de la chaudière, un condenseur beaucoup plus froid. L'organisme humain ne présente jamais, entre ses divers points, plus de deux ou trois degrés de différence de température. La chute de chaleur serait donc trop faible pour compenser une notable transformation corrélative d'énergie calorifique en énergie mécanique.

Il y a donc autre chose. Mais de ce que le moteur animé n'est pas assimilable à un moteur thermique, il n'en faudrait pas conclure que le principe de Carnot et Clausius ne lui est pas applicable.

La machine à vapeur sert à transformer de l'énergie calorifique en énergie mécanique. Mais, dans la machine à vapeur, l'énergie première d'où l'on était parti est de l'énergie chimique : la combustion la transforme tout entière en énergie calorifique, et de cette énergie calorifique une fraction restreinte, pratiquement 10 à 15 °/₀, passe, seule, à l'état d'énergie mécanique : c'est donc seulement 10 à 15 °/₀ de l'énergie chimique qu'on recueille sous forme de travail. La pile électrique permettait au contraire de recueillir sous forme de travail la presque totalité de l'énergie chimique dépensée. Le prix élevé du zinc empêche seul d'utiliser, industriellement, l'avantage théorique incontestable que présente la pile sur la machine à vapeur.

La comparaison de ces deux appareils transformateurs d'énergie, est donc toute à l'avantage de la pile.

Elle pourrait nous conduire à raisonner ainsi : la pile, en lui adjoignant un moteur électrique, transforme en énergie mécanique, sans aucune dégradation compensatrice, la chaleur qui provient de l'attaque du zinc; elle met donc en défaut le principe de Carnot. Il suffit, pour démasquer le sophisme, de dire : la pile transforme en énergie mécanique, non *la chaleur qui provient de l'attaque du zinc*, mais *l'énergie chimique mise en jeu dans l'attaque du zinc* ; elle la transforme en énergie mécanique sans avoir besoin de mettre au préalable cette énergie chimique sous la forme inférieure d'énergie calorifique.

La machine animale nous offre un processus analogue : si les aliments que brûle l'oxygène respiré étaient brûlés dans une chaudière de machine à feu, le travail mécanique obtenu serait incomparablement moindre que le travail musculaire que peut donner l'animal. Mais cela ne prouve point que la machine animale, pas plus que la pile, échappe au principe de Carnot. Elle permet la transformation directe d'énergie chimique en énergie mécanique, en évitant l'intermédiaire désastreux de l'énergie calorifique : ce passage d'une forme à une autre d'énergie se fait par l'intermédiaire d'une forme spéciale et nouvelle d'énergie, qu'on pourrait appeler *énergie physiologique*. Par ce mot, on ne prétend pas donner une explication : ce genre d'explication ressemblerait singulièrement, si l'on en était dupe, aux explications des médecins de Molière, et à la *vertu dormitive* de l'opium. On rappelle simplement, par ce mot, que la transformation d'énergie chimique en énergie mécanique se fait, dans la machine animale, par l'intermédiaire de quelque forme supérieure d'énergie, qui nous est mal connue, mais qui n'est certainement pas une forme inférieure telle que la forme calorifique. On énonce là un fait précis et déterminé. Cette

énergie physiologique, quelle qu'elle puisse être, joue un rôle identique à celui de l'énergie électrique par laquelle, dans la pile associée à un moteur, se fait le passage de la forme chimique à la forme mécanique.

On n'est donc pas obligé d'invoquer en faveur de la machine animale une dérogation au principe de Carnot.

Il n'en reste pas moins vrai que l'animal, en jouant ce rôle d'intermédiaire, permet d'utiliser sous forme d'énergie de qualité supérieure une énergie de qualité inférieure qui, sans lui, se dégraderait; il ralentit donc, dans une certaine mesure, la dégradation d'énergie qui est la loi du monde où il vit.

Comme conclusion à ses beaux travaux de calorimétrie animale, J. Lefèvre indique que l'énergie produite à l'intérieur de l'organisme d'un animal à sang chaud, ou *homéotherme*, se divise en général en trois parts : 1° *l'énergie physiologique minimum*, destinée à l'entretien du mécanisme vital, tel que les mouvements du cœur, etc., et qui représente chez l'homme adulte une dépense moyenne de 1.500 calories en 24 heures, — énergie qui, dans le repos complet, se dégage finalement à l'état de chaleur ; 2° outre cette énergie minimum, qui est une dépense inévitable imposée à l'organisme, une production calorifique supplémentaire, si l'homéotherme doit lutter contre le froid pour maintenir sa température : cette production calorifique représente une *chaleur animale* bien distincte de la précédente; c'est la chaleur de la *fonction thermogénétique*, dont le taux augmente très rapidement avec la différence de température entre l'animal et le milieu ; 3° enfin, si l'animal travaille, l'énergie dépensée pour accroître l'activité des tissus, et dont une partie peut être recueillie à l'extérieur sous forme d'énergie mécanique.

## § 3. — LES TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE DANS LES MUSCLES.

C'est dans la production de cette troisième partie de l'énergie animale, qu'il y a transformation partielle de l'énergie chimique des aliments en énergie mécanique, suivant un processus sur lequel les travaux de M. Chauveau ont jeté une vive lumière.

Non content d'une étude synthétique portant sur un organisme tout entier, M. Chauveau a voulu saisir le mécanisme de la production du travail dans l'organe mécanique lui-même, dans le *muscle*.

Un muscle peut travailler de deux manières : il peut rendre un travail véritable, au sens ordinaire et mécanique du mot. C'est ainsi que le biceps produit un vrai travail extérieur lorsque la main saisit un poids et qu'elle le soulève à une certaine hauteur. Mais le muscle peut encore être le siège d'une dépense de force lorsqu'il exerce un effort continu. et qu'il se contracte, sans qu'il y ait cependant travail extérieur. Dans le langage de l'énergétique biologique, on dit qu'il y a *travail statique*. Tel est le cas lorsqu'on soutient un poids à bras tendu.

Comparer directement le muscle au repos et le muscle qui produit du travail extérieur serait très complexe, car les réactions chimiques sont plus actives dans le muscle qui travaille. L'idée essentielle de Chauveau et de ses collaborateurs est de comparer le muscle qui produit un effort statique et celui qui produit du travail extérieur. On peut rendre, dans les deux cas, les réactions identiques, et vérifier qu'elles produisent un inégal dégagement de chaleur. Le biceps qui maintient un poids à bras tendu, et celui qui effectue un vrai travail mécanique, *lorsqu'ils sont le siège de réactions également actives*, s'échauf-

fent inégalement. De deux muscles également contractés, celui qui développe un simple effort statique s'échauffe plus que celui qui accomplit un travail.

Les expériences ont porté sur le muscle releveur de la lèvre supérieure du cheval. A l'état d'activité normale, ce muscle est traversé par un flux de sang cinq fois plus grand qu'au repos, en même temps qu'il absorbe vingt fois plus d'oxygène et qu'il s'y brûle trente-cinq fois plus de carbone.

En sectionnant, sur un cheval, le tendon de ce muscle du côté droit, on empêche le muscle droit de produire du travail effectif, mais non de se contracter. Si on présente à l'animal un repas d'avoine, le muscle gauche se contracte et relève le côté gauche de la lèvre; le muscle droit se contracte aussi, mais ne tirant que sûr un tendon coupé, il ne produit pas de travail extérieur; il produit seulement un effort statique. Or, les deux muscles ont alors leur activité également accrue : en prélevant du sang à l'entrée et à la sortie des deux muscles droit et gauche, on trouve, à l'analyse, des résultats identiques des deux côtés. L'excès d'énergie chimique dépensée dans le muscle en activité sert donc, à droite, à entretenir le muscle en état de contraction, et à cela uniquement ; à gauche, elle sert à entretenir l'état de contraction et, en outre, à produire un travail mécanique.

Or, le muscle droit se trouve porté à une température qui dépasse de 0°,47 celle du muscle au repos; le muscle gauche à une température qui dépasse seulement celle du muscle au repos de 0°,42. Le travail mécanique produit par ce dernier a pu être mesuré en sectionnant le tendon du muscle gauche, et lui substituant une lanière élastique de caoutchouc. On a trouvé, au cours d'une expérience, que le travail du muscle est de 30 centièmes de kilogrammètre par minute. La chaleur dégagée dans les deux muscles peut, à son tour, être déduite du poids du

sang qui a traversé le muscle et de son élévation de température, car le sang s'échauffe en circulant dans un muscle contracté : cette chaleur a été, en une minute, de 7 petites calories — exactement 7,28 — dans le cas du muscle droit et de 6 calories 1/2 dans le cas du muscle gauche. La différence, — 78 centièmes de petite calorie, — équivaut à un travail de 33 centièmes de kilogrammètre, c'est-à-dire très sensiblement au travail effectué par le muscle producteur d'énergie mécanique.

Travail et chaleur sont donc empruntés à l'énergie des réactions chimiques supplémentaires qui se passent dans le muscle contracté. La contraction se réduit-elle à un effort statique sans travail extérieur, l'énergie chimique se dégrade et se retrouve toute à l'état de chaleur. S'il y a, au contraire, travail extérieur, ce travail est directement emprunté à l'énergie chimique, le déchet seul retombant toujours à l'état d'énergie calorifique. Quelle que soit l'énormité de ce déchet — près des 9 dixièmes dans l'expérience de Chauveau — la fraction transformée en énergie mécanique atteint néanmoins une valeur qu'elle ne pourrait jamais avoir si l'énergie chimique avait pris au préalable la forme inférieure d'énergie calorifique.

Il est possible que, dans l'analyse des phénomènes si curieux que nous offrent les colloïdes, on arrive à trouver des transformations directes d'énergie chimique en travail, ou que, s'il existe une forme intermédiaire de l'énergie par laquelle doive se faire cette transformation, ce soit encore, comme dans le cas de la pile, la forme électrique. En tous les cas, la transformation, dans le muscle, de l'énergie chimique en énergie mécanique est une transformation d'une énergie de qualité supérieure en une autre de qualité équivalente : elle ne constitue aucune exception à la loi générale de dégradation.

## § 4. — L'ÉNERGÉTIQUE VÉGÉTALE.

La même conclusion s'impose si l'on porte son attention sur les végétaux. M. Duhem, dans le passage cité, a très bien vu que les réactions restauratrices d'énergie chimique libre, dans les tissus des plantes, s'accomplissent sous l'influence de la lumière, c'est-à-dire d'une énergie émanée d'une source à température fort élevée. Il y a donc une dégradation d'énergie compensatrice qui permet la reproduction d'énergie potentielle chimique aux dépens d'énergie calorifique. C'est, par excellence, le cas où « intervient une énergie étrangère », pour parler le langage de la Thermochimie de Berthelot.

Si on enferme dans une caisse imperméable à la chaleur, à la lumière, et, d'une façon générale, à toute forme d'énergie, des plantes vertes, et, avec elles, les appareils nécessaires pour alimenter une lampe électrique à arc, une batterie d'accumulateurs, par exemple : sous l'influence de la lumière de l'arc, les plantes pourront décomposer l'acide carbonique et restaurer ainsi l'énergie chimique que représentent le charbon et l'oxygène ; mais cette restauration d'énergie de qualité supérieure sera compensée, et au delà, par la dégradation que comporte le rayonnement de l'arc, source chaude qui envoie chaleur et lumière sur des corps plus froids. Si l'arc électrique est produit par une action chimique, on trouvera toujours que l'ensemble des réactions chimiques accomplies à l'intérieur de la caisse, dans les plantes et dans les piles, comporte, au total, dégradation ; pratiquement, que la somme des réactions est exothermique.

Ce qui est vrai, c'est que l'introduction du végétal dans la caisse a pour résultat de rendre la dégrada-

tion de l'énergie moins rapide et moins complète. Au lieu de laisser se gaspiller toute l'énergie utile, la plante en met en réserve une partie, mais elle ne crée pas, sans dépense, de l'énergie libre.

### § 5. — ÉVOLUTION ET DÉGRADATION.

Les remarques qui précèdent donnent la clef de l'opposition apparente qui existe entre la doctrine de l'évolution et le principe de la dégradation de l'énergie. La physique nous représente un monde s'usant sans trêve. Une philosophie qui prétend s'appuyer sur la biologie nous dépeint au contraire avec complaisance un monde s'améliorant sans cesse, où la vie physiologique va se perfectionnant toujours, jusqu'à prendre chez l'homme pleine conscience d'elle-même, et où nulle limite ne semble imposée au progrès éternel. Observons que cette seconde idée, — l'idée du progrès indéfini, — a, beaucoup plus que la première, fourni matière à des développements littéraires. C'est, sans aucun doute, que les faits scientifiques, sur lesquels elle est échafaudée, se prêtent à une vulgarisation autrement facile, que les faits scientifiques dont l'exposé constitue le principe de Carnot.

Selon nous, le principe de la dégradation de l'énergie ne saurait rien prouver contre le fait de l'évolution. La transformation progressive des espèces, la réalisation d'organismes plus parfaits, n'a rien de contraire à l'idée de la déperdition constante d'énergie utilisable. Seulement, les vastes et grandioses conceptions de philosophes imaginatifs qui érigent en principe absolu la loi du « progrès universel » ne sauraient prévaloir non plus contre une des idées les plus fondamentales que nous révèle la physique. D'une part donc, le monde s'use; d'autre part, l'apparition sur la terre d'êtres vivants de plus en plus

élevés, et, dans un ordre d'idées un peu différent, le développement de la civilisation au sein des sociétés humaines, donnent sans contredit l'impression d'un progrès et d'un gain. Il ne s'agit pas de « concilier » des choses qui ne sont pas contradictoires ; il s'agit seulement de savoir les énoncer en un langage qui fasse apparaître visible l'absence réelle de contradiction.

Nous croyons que l'on peut dire :

Les êtres vivants ont pour rôle de ralentir la dégradation de l'énergie dans le monde. Ce rôle, ils s'en acquittent, plus ou moins bien, inconsciemment ou consciemment. C'est ce que fait, avec une perfection spéciale, l'homme qui capte les « forces naturelles » ; l'homme qui se sert d'une chute d'eau pour faire tourner sa roue hydraulique distrait, sous forme d'énergie mécanique, une énergie qui se serait gaspillée et transformée en énergie calorifique inutile. A tous les degrés de l'échelle des êtres, tout ce qui vit est capable d'accroître la fraction utilisée de l'énergie de l'univers. Le résultat palpable de l' « évolution », en quelque domaine qu'elle se manifeste, se traduit en définitive par une augmentation de *l'énergie utilisée* de l'univers.

Mais l'énergie *utilisée* ne doit pas être confondue avec *l'énergie utilisable*. On a défini l'énergie utilisable d'un système fermé, par la dose maximum d'énergie de qualité supérieure qu'il est possible d'en extraire ; et l'on a souvent employé dans les chapitres précédents, comme synonyme d'énergie utilisable, le terme plus bref d'*énergie utile*. *L'énergie utilisée* est tout autre chose. Ce dernier terme comporte un élément relatif et subjectif qui était absent du premier. Entre l'énergie utilisable et l'énergie utilisée existe la différence qui sépare un terrain propre à la culture d'un champ cultivé.

Cette énergie utilisée n'est et ne sera de longtemps qu'une fraction imperceptible de l'énergie *utilisable*. Et l'on conçoit sans peine que *l'énergie utilisée puisse augmenter, tandis que l'énergie utilisable diminue*. Quelque rapide que puisse jamais être le « progrès », jamais il ne saurait faire que l'énergie utilisée dépasse l'énergie utilisable. Et, pour nous borner à l'énergie utilisable que renferme notre système solaire, — et ne pas encourir ainsi le reproche de raisonner sur l'ensemble de l'univers, — nous n'en savons utiliser qu'une part infime : c'est cette petite part utilisée, qu'accroît le développement de la vie à la surface de notre globe, et qu'accroît surtout, lorsqu'il n'est pas effectué à rebours, le développement de la civilisation. L'ensemble de l'énergie utilisable n'en va pas moins diminuant sans cesse, d'une façon lente, mais sûre. De jour en jour, nous savons tirer un parti meilleur d'une richesse qu'on a longtemps laissée se gaspiller sans profit; mais cette richesse se réduit chaque jour. Comme elle est immense, nous n'apercevons pas cette réduction, et nous ne prenons garde qu'à l'accroissement rapide de la fortune réelle; mais cet accroissement n'empêchera point qu'il ne vienne un temps où le trésor sera épuisé. Telle une île, surgie au sein de l'Océan, et soumise à un affaissement graduel : la mer gagne chaque année sur elle quelques millimètres de niveau; d'abord en friche, l'île est mise en culture par les habitants qui y ont abordé : ces habitants ont devant eux un domaine immense dont une fraction minime suffit à tous leurs besoins ; à ce domaine, ils ne connaissent pas de limites, et, comme, de mieux en mieux, ils savent le travailler, ils en viennent à n'assigner aucune borne à leur ambition. Cependant, l'invasion de l'Océan se poursuit, progressive et régulière, et, dans un avenir certain, la mer engloutira l'île tout entière. Pour grossière que soit la comparaison, elle a le mérite

de nous donner une image de l'énergie utilisable que contient notre monde planétaire. Les progrès de la vie et de l'intelligence sur la terre permettent d'en tirer chaque jour un meilleur parti. Ils ne sauraient faire que l'énergie utilisable du monde n'aille sans cesse en décroissant.

L'opposition entre le principe de la dégradation de l'énergie et l'évolutionnisme n'est donc qu'une opposition apparente : elle suffit pourtant pour que nous ne goûtions pas le nom de *principe d'évolution*, donné par Jean Perrin à la loi de la dégradation de l'énergie. Cette loi marque bien une évolution dans le monde, mais une évolution qui s'effectue au rebours du « progrès » que l'on entend d'ordinaire par ce mot d'évolution.

Encore, faut-il prendre garde que l'être vivant, et particulièrement l'homme, capable de ralentir, dans une certaine mesure, la dégradation de l'énergie dans le monde, peut aussi, — et c'est ce qui lui arrive trop souvent, — accélérer la dégradation.

Ostwald a dit que la civilisation consiste dans l'art de se servir de l'énergie brute de la nature. Les armes successives imaginées par les hommes représentent des étapes successives dans l'utilisation des diverses formes usuelles d'énergie : l'arme à frapper, qui emploie l'énergie cinétique de la matière, a fait place à l'arme lancée, qui utilise l'énergie potentielle d'un ressort bandé, puis à l'arme à feu, qui s'adresse à l'énergie chimique contenue dans une poudre. Mais tous les progrès de la civilisation ne sont pas également bons. Si l'action de l'homme est toujours limitée par l'impossibilité de faire marcher le monde à reculons, il a le pouvoir de ralentir ou d'accélérer la dégradation. L'industrie, bienfaisante quand elle ralentit la dégradation de l'énergie, est malfaisante quand elle l'accélère et qu'elle pratique la dévas-

tation de la nature, la « Raubwirthschaft ». Le « libre jeu des lois naturelles » comporte la tendance universelle à la dissipation des formes utiles de l'énergie ; la mesure dans laquelle une époque lutte contre cette tendance pourrait être prise pour la mesure même de son degré de civilisation. A cet égard, les pires des barbares sont certains civilisés. Et il est bien vrai de dire que, « la Nature », si elle n'est pas « bonne », — puisqu'elle s'use sans cesse, — et si elle est susceptible d'être améliorée par la véritable civilisation, devient pire si elle est aux mains du civilisé barbare. La vieille question, agitée par Rousseau, de l'infériorité ou de la supériorité de l' « état de société » par rapport à l'« état de nature », pourrait, en un sens, être réduite à cette autre : la société a-t-elle pour résultat d'accélérer ou de ralentir la dégradation de l'énergie dans la nature ?

## CHAPITRE XIV

# Le rôle de l'industrie.

---

### § 1. — LES TRANSFORMATIONS ARTIFICIELLES.

Chose étrange! pendant longtemps l'industrie a paru ignorer le principe de la dégradation de l'énergie, et c'est l'industrie pourtant qui l'a suggéré! L'industriel semblait ne faire état que du principe de la conservation, c'est-à-dire du premier principe de la Thermodynamique. Et le second principe est l'œuvre d'un théoricien de génie, sans doute, mais d'un savant qui pensait uniquement, en l'énonçant, aux applications industrielles!

Moins que personne, l'ingénieur et l'industriel devraient l'ignorer. A quoi se réduirait le rôle de l'industrie s'il n'y avait aucune dégradation d'énergie dans les phénomènes naturels, si réellement *rien* ne se perdait? Si les transformations artificielles étaient aussi aisées à produire que les transformations naturelles, le problème de la main-d'œuvre ne se poserait plus.

*Le rôle de l'industrie est précisément de produire des transformations artificielles d'énergie.* L'industrie remonte sur le sommet d'une montagne des wagons qui en sont descendus sur des rails, et qui ont pu en

descendre par l'effet de la pesanteur seule; dans cette descente, comme dans celle d'une automobile qui descend une côte après avoir éteint le moteur, il y a un travail mécanique qui est dépensé, celui de la pesanteur; en échange se produit de la chaleur par les frottements contre les freins, et ces frottements usent les roues des véhicules et les pneumatiques de l'automobile. La nature n'ira pas toute seule reprendre cette chaleur produite par les frottements pour la transformer en travail mécanique utile, susceptible de faire gravir à nouveau la pente au wagon ou à la voiture; c'est un problème que l'industriel devra résoudre.

De même l'eau d'une source suit sa pente, et coule vers le bas. L'industrie pourra la forcer à monter dans des réservoirs élevés, d'où elle se distribuera dans une ville.

Les minerais métalliques : oxydes de fer et de zinc, sulfures de cuivre et de plomb, sont des composés qui ont été formés à partir de leurs éléments avec dégagement de chaleur : leur production a correspondu à la transformation d'énergie chimique libre en énergie calorifique. Restaurer cette énergie chimique libre, moyennant une dépense d'énergie calorifique, et obtenir ainsi les métaux purs, sera une transformation artificielle qui est l'objet de l'industrie métallurgique.

Et les innombrables métiers qui ont simplement pour objet le changement de forme et l'adaptation à nos usages de matières dont ils ne changent pas la nature, présupposent l'emploi d'une réserve d'énergie utilisable, qui doit être mise à leur disposition par l'industrie primordiale : celle de la production de la puissance mécanique. Cette industrie primordiale est, par excellence, l'effort contre la tendance naturelle à la dissipation de l'énergie mécanique.

A coup sûr, il se produit dans la nature de ces

transformations, que Clausius nommait *négatives* et que j'appelle *artificielles*. Mais quand elles se produisent, elles sont plus que compensées par une transformation *positive* ou *naturelle* corrélative. La décomposition de l'anhydride carbonique avec fixation du charbon par les feuilles vertes est, nous l'avons vu, une transformation artificielle qui ne s'effectue qu'à la faveur de la chute de chaleur tombant du foyer solaire sur notre terre beaucoup plus froide. De même, les transformations artificielles d'énergie que réalise l'industrie ne se feront jamais que moyennant une transformation naturelle d'énergie qui soit au moins équivalente. C'est le cas de répéter le mot de Bacon : *Natura non vincitur, nisi parendo.*

Nous ne pouvons donc pas faire marcher le monde à contre-courant. et arrêter la dégradation de l'énergie. Mais là où intervient le rôle de l'homme raisonnable, c'est qu'il peut, suivant sa conduite, modérer ou précipiter l'usure et la détérioration du monde : son action peut être régulatrice ou néfaste. *Et cette action, longtemps poursuivie, arrive à n'être nullement négligeable.*

L'homme peut, de deux manières, accélérer la dégradation : — en opérant lui-même des transformations naturelles non compensées, dans le même sens que celles qui dominent dans la nature, — ou encore en rendant impossibles les transformations artificielles qui viennent à se produire dans la nature. Il produit une transformation naturelle non compensée quand il brûle du charbon pour se chauffer : il transforme en énergie calorifique de l'énergie chimique libre. Il empêche une transformation artificielle compensatrice de se produire dans la nature, quand il arrache du sol l'armature végétale, tapis gazonné ou forêts protectrices, se privant ainsi, sans aucun avantage qui puisse l'en dédommager, de l'énergie chimique qu'élaboraient les plantes vertes; l'énergie

calorifique et lumineuse du soleil est, en ce cas, rayonnée sur la terre, sans qu'il y ait compensation aucune à l'énorme dégradation qu'elle subit en tombant d'un foyer aussi chaud sur une terre froide. Nous avons abattu nous-mêmes une des digues naturelles qui arrêtent l'action dégradatrice de la nature. Nous en reconnaîtrons tôt ou tard les conséquences néfastes.

Et qu'on ne dise pas que tout ceci n'intéresse que le philosophe, et non l'homme préoccupé des applications industrielles. Veut-on quelques exemples concrets? Nous avons à notre disposition de l'énergie chimique. Quel parti en tirer?

L'usage le plus ordinaire que l'on fasse de l'énergie chimique qu'on détient en réserve, c'est de la convertir en chaleur. Un kilo de charbon donne, en brûlant, environ 8.000 grandes calories. Mais une fois l'énergie chimique convertie en chaleur, on n'en pourra plus tirer qu'une faible fraction d'énergie mécanique.

On aurait eu grand avantage, si la chose eût été possible, à transformer directement l'énergie chimique en énergie mécanique ou électrique.

C'est justement ce qu'on fait dans la pile.

Dira-t-on que cette préoccupation d'éviter l'intermédiaire désastreux de l'énergie calorifique serait inutile à l'ingénieur? Et le jour où l'on aurait découvert le moyen de transformer directement en énergie électrique l'énergie chimique que représente le charbon en présence de l'air, au lieu de le brûler purement et simplement, on aurait fait une découverte grosse de conséquences industrielles.

Dans l'animal, la combustion des aliments par l'oxygène respiré peut également donner de l'énergie mécanique, représentée par le travail du moteur animé, avec un rendement beaucoup plus fort que si l'énergie chimique avait été préalablement

mise à l'état de chaleur. Le moteur animé, pour la même énergie de combustion, a un rendement très supérieur à celui d'un moteur thermique travaillant dans les mêmes conditions de température.

Ne serait-ce pas un thème à méditations utiles pour l'inventeur qui chercherait à surprendre les procédés mis en œuvre dans les êtres vivants, et à les imiter pour améliorer le rendement de nos machines?

Le rendement lumineux des animaux photogènes est incomparablement supérieur à celui de nos sources artificielles les meilleures, parce que, dans les transformations successives qui ont amené l'énergie chimique qui fait vivre ces êtres jusqu'à l'état d'énergie rayonnante, il y a eu beaucoup moins d'intermédiaires entraînant dégradation d'énergie que dans la production des lumières artificielles ordinaires.

Il faudrait des volumes pour discuter ces problèmes. Je ne fais que les indiquer pour montrer quelle place devrait tenir l'idée de la dégradation de l'énergie dans les méditations d'un praticien adonné aux applications industrielles, qu'il s'occupe de chimie, d'éclairage ou de production électrique de force.

A vrai dire, l'idée de dégradation commence à pénétrer dans les ouvrages de physique et d'électricité industrielles. M. Janet, dans ses excellents « Premiers principes d'électricité industrielle », en signalait déjà l'intérêt, et, l'un des premiers, sinon le premier, naturalisait en France l'heureuse dénomination de « dégradation de l'énergie ». — Dans une conférence faite en 1905 à la Société française de physique, sur la construction des dynamos à courant continu, M. Picou rappelait, comme une notion courante, que l'énergie mécanique est la plus économique de toutes les formes supérieures de l'énergie[1]. — Dans une

1. Bulletin de la *Société française de physique*, année 1905, p. 145.

conférence faite à la même Société sur *les Progrès récents de l'éclairage électrique*, M. Weiss invoque constamment des considérations fondées sur l'application du principe de la dégradation de l'énergie[1].

### § 2. — L'UTILISATION DES CHUTES D'EAU.

Mais l'idéal de l'industrie ne serait-il pas, au lieu de provoquer de nous-mêmes des transformations naturelles d'énergie comme la combustion du charbon, de nous opposer, au contraire, autant que possible, à ces transformations naturelles, et de recueillir directement l'énergie utilisable que la nature nous présente ? Il y a là double bénéfice : nous sommes dispensés de fabriquer nous-mêmes l'énergie utilisable qui nous est donnée; et nous arrêtons en partie la dégradation de cette énergie utilisable.

C'est ce double avantage que nous procurons en utilisant pour la production de l'énergie mécanique les chutes d'eau. Si nous n'exploitons pas la chute, elle pourra donner lieu à des effets pittoresques ; en pareil cas, il faut se garder d'attenter, par des considérations utilitaires, à la poésie de nos sites : l'œuvre à faire est assez vaste aux points où l'on ne nuit en rien à la beauté des paysages. Mais, — en dehors de ce cas, — nous savons que l'effet physique et mécanique de l'eau courante est une perte de force vive par frottements contre le lit, et contre les rives ; et une transformation d'énergie cinétique en énergie calorifique par chocs et par tourbillons. C'est une dégradation d'énergie, qui ne profite à personne. Et il y a plus. Ces frottements et ces tourbillons creusent le lit du torrent, attaquent les rives, exigent des travaux de protection et de défense si l'on entend

1. *Loc. cit.*, p. 207.

mettre en valeur toute la terre que l'eau ne recouvre pas. Celui qui, captant cette force vive de l'eau courante, la transforme en énergie électrique, qui, sans dégradation, lui permet de la reporter et de la distribuer au loin, celui-là rend un véritable service à la société. Avec l'énergie mécanique de la chute, il pourra monter des matériaux, provoquer l'ascension d'une réserve d'eau dans un réservoir élevé, restaurer de l'énergie potentielle chimique. Il empêche l'énergie utilisable de la nature à la fois de se perdre et de nous nuire.

Et telle est une raison profonde pour laquelle celui qui aménage une prise de « houille blanche » mérite d'être encouragé et garanti contre l'obstruction. Il ne fait pas seulement œuvre immédiatement utile. Il donne un exemple salutaire d'usage rationnel et intelligent des ressources naturelles.

### § 3. — LE DROIT D'ABUS.

Ceux qui, au contraire, brûlent, en houille et en bois, une quantité plus grande de carbone dans une année, que l'ensemble des végétaux de notre globe n'en peut reprendre sur l'acide carbonique de l'air dans le même temps, ceux-là font œuvre nuisible. Qu'en cas de besoin, il soit permis de prendre sur cette réserve d'énergie utilisable et d'attaquer ce trésor de guerre, nous n'aurions garde de le nier. Mais que l'on puisse impunément y puiser sans compter, c'est ce que nous contestons. A brûler en un an plus qu'il ne se reforme en un an, il y a, véritablement, *abus*. Et il y a abus encore, et abus singulièrement grave, à réduire, ou à détruire la faculté que garde la nature végétale de produire des transformations artificielles qui viennent compenser en partie les transformations naturelles. Là où la

nature est bienfaisante, il faut l'aider, non la contrarier; et nulle part, elle n'est plus bienfaisante que là où il semble qu'elle fasse effort pour remonter le courant qui l'emporte vers la destruction de toute énergie utilisable. L' « abus » dans l'usage de la propriété de la terre, pourrait être défini, soit comme la provocation à de nouvelles transformations naturelles, s'ajoutant à celles qui se passeraient sans nous, — soit comme la limitation du pouvoir que garde la nature de produire, en certains cas, des transformations artificielles.

J'ai, ailleurs, appelé l'attention sur là liaison logique entre l'idée fausse d'un monde qui ne s'use pas, d'un monde où « rien ne se perd », et la thèse qu'on peut, sans aucun souci de lointain avenir, faire du monde et des biens de la terre ce que l'on veut, qu'il n'y a aucun danger à laisser à quiconque, sur sa propriété, le droit d'user et d'abuser.

On sait assez quels graves inconvénients ce laisser-faire a produits, et comment le déboisement, pratiqué surtout en grand depuis la suppression des « maîtrises des eaux et forêts » et la vente des biens nationaux, a ruiné notre navigation intérieure. Ces inconvénients, ces dangers, ce mal qui s'est fait et qui est devenu sensible en si peu de temps, — mal auquel la houille blanche a obligé à prendre garde, ce qui n'est pas le moindre service qu'elle ait rendu, — n'auraient-ils pas plus tôt frappé les esprits, ne se seraient-ils pas imposés plus tôt à l'attention de quiconque réfléchit, si la vulgarisation courante, partiale et tronquée, de la « conservation de l'énergie » n'avait pas rendu longtemps les cerveaux réfractaires à l'idée que, dans le monde matériel, dans notre terre, quelque chose peut se perdre et s'user, et que l'homme a, vis-à-vis du monde matériel, des devoirs en même temps que des droits?

« C'est le droit d'user et d'abuser, écrivait Proud-

hon *en 1868*, que le siècle s'efforce de retenir et avec lequel il ne peut plus vivre, qui produit de nos jours la désertion de la terre et la désolation sociale. La métaphysique de la propriété a dévasté le sol français, découronné les montagnes, changé les rivières en torrents, empierré les vallées, le tout avec autorisation du gouvernement. Elle a rendu l'agriculture odieuse au paysan, plus odieuse encore la patrie; elle pousse à la dépopulation. »

J'ai dit, ailleurs[1], comment la conception de la propriété que nous avons héritée du droit romain, — en renchérissant sur le droit romain, — nous a mis en état d'infériorité sur les peuples qui ont une conception moins absolue des droits de l'homme sur la nature. Mais je crois que cette conception romaine a largement bénéficié, en France, de la complicité d'une opinion maintenue, à l'égard de l'avenir du monde matériel, dans un optimisme béat par l'ignorance systématique de l'idée de dégradation et par la répétition à contre-sens de la formule : « Rien ne se crée, rien ne se perd ».

A l'encontre de cette erreur, il nous semble particulièrement important de maintenir ou de rétablir ce qui est la vérité scientifique : pour cette raison, d'abord, — qui pourrait suffire, — qu'elle est la vérité; et, pour cette autre raison, que la vérité, ici, est particulièrement féconde.

1. *Houille blanche, déboisement et droit de propriété.* Fribourg, 1905.

## CHAPITRE XV

# La dégradation de l'énergie intra-atomique.

---

### § 1. — LA RADIOACTIVITÉ MET-ELLE EN DÉFAUT LA LOI DE LA DÉGRADATION DE L'ÉNERGIE ?

L'espoir de prendre en défaut la loi de dégradation ne semble pas justifié par l'étude de l'être vivant. Mais cet espoir est tenace ; et ce que la vie ne nous a pas présenté, on a tenté de le découvrir ailleurs.

Quelques personnes ont pensé trouver, dans les découvertes tout à fait modernes qui ont renouvelé la physique, le moyen d'échapper aux prises de la loi de dégradation. On s'est demandé si les phénomènes de radioactivité qui semblent bien, ainsi que l'avait pressenti le docteur Gustave Le Bon, constituer une propriété générale de la matière et non l'apanage exclusif de quelques substances exceptionnelles, ne venaient pas donner un démenti aux lois fondamentales de la science de l'énergie. Allant plus loin, on a cru pouvoir affirmer que le retour du monde matériel à son état primitif, et par conséquent sa pérennité, étaient désormais assurés. Au début de notre système solaire, par exemple, que s'est-il passé? Une concentration d'éléments matériels très rares en une matière plus dense, et probablement en atomes chimiques distincts. Nous assistons aujourd'hui à la dissociation, ou, comme on

l'a dit, à la *dématérialisation de la matière*, qui se résout en fragments d'atomes; nous prenons sur le vif cette destruction dans le radium : nous avons des raisons de penser qu'elle existe dans tous les corps. Donc, au début du monde, formation des atomes et concentration de la matière; à la fin, dissociation de la matière et retour au chaos initial; le monde tourne dans un cercle sans commencement ni fin.

A ce roman scientifique, il y a un léger défaut : c'est qu'il méconnaît le fait scientifique fondamental. *La concentration de la matière cosmique en un amas central, et, d'autre part, la dissociation de la matière radioactive, sont deux phénomènes qui paraissent contraires; ils ont, tous deux, un caractère essentiel commun : tous deux dégagent de la chaleur.* La production de chaleur par la concentration de la matière cosmique n'est pas douteuse; la production de chaleur par le radium qui se détruit, en projetant au dehors des particules électrisées, est l'une des grandes découvertes de Curie. Il y a donc, entre la concentration de la matière cosmique et la dissociation de la matière radioactive, le même rapport qu'entre une combustion spontanée, celle du charbon à l'air, et une explosion comme celle de la dynamite; la première de ces réactions chimiques est une combinaison, la seconde une décomposition : toutes deux dégagent de la chaleur; toutes deux correspondent au passage d'énergie chimique de qualité supérieure à la forme inférieure d'énergie calorifique, c'est-à-dire que toutes deux entraînent dégradation d'énergie. Quand le charbon est brûlé, quand la dynamite a fait explosion, il y a quelque chose d'usé; il faut une dépense pour remettre les choses en état, pour décomposer l'acide carbonique ou pour ramener en combinaison les éléments qui constituaient la dynamite.

## § 2. — L'ÉNERGIE INTRA-ATOMIQUE.

M. Gustave Le Bon a, le premier, appelé l'attention sur l'énorme provision d'énergie que renferme l'atome d'un corps matériel quelconque, qui possède, atténuées, les propriétés de l'atome radioactif : Il a donné à cette provision d'énergie mise en jeu dans la dissociation de l'atome le nom d'*énergie intra-atomique*, et a fait, de l'existence de cette énergie, une notion familière, par ses livres suggestifs, et tout spécialement par son *Évolution de la matière*, à laquelle il a donné pour exergue : « Rien ne se crée ; tout se perd ».

La chaleur totale qu'émet 1 gramme de radium pendant sa « vie » est de 1.600.000 grandes calories, d'après Rutherford. Or, la chaleur dégagée par la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène pour former 1 gramme d'eau est d'environ 4 grandes calories, et cette réaction dégage, à poids égal, plus de chaleur qu'aucune autre réaction chimique. L'énergie *intra-atomique* que renferme 1 gramme de radium, et qu'il est susceptible de libérer en se détruisant, est donc environ un million de fois plus grande que l'énergie mise en jeu dans les changements moléculaires. Cette simple comparaison de chiffres a pu légitimement suggérer l'idée que l'énergie intraatomique est le grand réservoir d'énergie de l'univers.

Peut-être l'expression de cette idée a-t-elle été, parfois, un peu trop associée à la proclamation de la faillite des anciens principes de la physique. Ce qui est incontestable, c'est que la découverte des phénomènes de radioactivité a rendu plus délicate la définition même du mot *énergie*, en nous offrant des exemples de particules dont l'énergie de mouvement augmente plus vite que le carré de leur vitesse ; elle rend, par conséquent, plus difficile un énoncé qui

reste rigoureux des principes de la conservation et de la dégradation de l'énergie. Mais il ne semble pas qu'elle porte atteinte au principe de la conservation, ni, à plus forte raison, à celui de la dégradation. Un principe, à la vérité, paraît sérieusement atteint par l'existence des phénomènes de radioactivité : c'est celui de la conservation de la matière. Il paraît bien qu'en certains cas, la matière peut disparaître, pour se résoudre en corpuscules « impondérables », — au sens usuel de ce mot, — et que la conservation du poids dans les réactions chimiques ne constitue qu'une loi approchée, largement suffisante assurément pour les besoins de la pratique, mais n'ayant plus ce caractère de loi absolue qu'on s'est plu si souvent à lui donner. C'est tout spécialement la loi de la *conservation de la masse individuelle de chaque corps simple* dans les réactions chimiques qui serait mise en question, si le temps venait définitivement confirmer ces expériences de Ramsay, sur la transmutation du cuivre en lithium, qui sont bien faites, suivant la pittoresque expression d'Ostwald, pour faire dresser les cheveux sur la tête aux chimistes orthodoxes, — *den orthodoxen Chemiker die Haare zu sträuben.*

Mais, quelle que soit l'étrangeté des faits nouvellement acquis à la science et la difficulté réelle qu'il y a souvent à les faire rentrer dans les anciens cadres, il nous semble que certains étonnements prouvent surtout à quel point la confusion entre l'énergie totale et l'énergie utile, répandue dans le grand public, a pénétré jusque dans l'esprit de certains savants.

« Supposons qu'un coffre-fort contenant plusieurs milliards en poudre d'or, dit M. Gustave Le Bon, soit fermé par un mécanisme tel qu'on ne puisse extraire chaque jour qu'un milligramme du précieux métal. Malgré sa grande richesse, le possesseur d'un tel coffre sera en réalité très pauvre, et il le restera tant que ses efforts n'auront pas réussi à lui faire

trouver le secret du mécanisme qui lui permettra de l'ouvrir[1]. »

Réflexion à coup sûr très judicieuse, dont je dirai seulement qu'elle eût pu être formulée avant la découverte de la radioactivité de la matière; — réflexion familière, sinon sous cette forme, du moins sous une forme équivalente, à quiconque n'a pas l'habitude de répéter la formule mensongère : « Rien ne se perd ».

### § 3. — PERTE D'ÉNERGIE UTILISABLE DANS LES TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES.

Lorsque Curie et Laborde reconnurent, en 1902, qu'un gramme de radium dégage 100 petites calories à l'heure, lorsqu'on eut mis ce dégagement de chaleur en évidence sous une forme ne prêtant à aucune critique, en plaçant le radium dans un vase de Dewar rempli d'hydrogène liquide, l'on ne tarda pas à se demander d'où provient cette énorme quantité d'énergie.

M et M^me^ Curie montrèrent qu'on avait le choix entre deux hypothèses fondamentales : ou grande énergie potentielle emmagasinée dans le corps; ou emprunt d'énergie par le corps à d'autres sources. Ils écartaient la première hypothèse, qui, disaient-ils, « ne paraît pas confirmée, parce que l'énergie du corps, dans cette hypothèse, devrait à la longue s'épuiser ». L'expérience n'avait pas encore démontré cet épuisement progressif des corps radioactifs.

C'est alors que lord Kelvin suggéra l'hypothèse de l'emprunt d'énergie à des radiations invisibles, captées par le radium. L'illustre physicien disait : si un thermomètre à boule noire se trouve à côté d'un thermomètre à boule incolore, dans l'air, et au soleil,

1. *Évolution de la matière*, p. 46.

ils ne marquent pas la même température; le thermomètre à boule noire marque une température supérieure. Or, ce thermomètre noir n'est plus chaud que parce qu'il absorbe les rayons solaires qui sillonnent l'espace. De même, il se pourrait que le radium absorbât des rayons invisibles et les rendît ensuite transformés, qu'il agît à la façon des corps phosphorescents.

A l'encontre de cette hypothèse, on a montré que, si l'on arrête toute radiation extérieure par un écran épais de plomb, on ne réduit à aucun degré l'émission de chaleur par le radium.

On a reconnu, d'autre part, qu'en dégageant de la chaleur, le radium se détruit. Il émet des corpuscules d'électricité négative sous forme de « rayons $\beta$ », en même temps que des ions positifs, « rayons $\alpha$ »; et, lorsque ces rayons sont arrêtés, leur énergie est transformée en chaleur, comme celle des rayons cathodiques, qui, dans les tubes de Röntgen, viennent porter à l'incandescence l'anticathode qui les arrête. Le radium donne en même temps l'*émanation*, qui se transforme finalement en hélium. Enfin l'on est parvenu à mettre en évidence sa perte de poids : d'après Rutherford, il faudrait 1.280 ans pour que la moitié de la précieuse matière disparût. L'hypothèse d'une énergie potentielle considérable, emmagasinée dans la matière radioactive, a donc paru de plus en plus vraisemblable, et c'est elle qui rallie pour l'instant le plus grand nombre des physiciens.

Il y aurait ainsi perte d'énergie dans la transformation finale du radium en hélium. Pour repasser de l'hélium au radium, il faudrait reprendre, pour la fixer sur l'hélium, toute l'énergie émise, et, en même temps, aller repêcher les rayons $\alpha$ et $\beta$, les électrons et les ions envolés de tous côtés. Il est très probable qu'on n'y parviendra jamais que par des méthodes

indirectes. De même, dit Ramsay, dans l'électrolyse du sel ammoniac, le courant coupe le sel en deux : d'une part, du chlore qui se sépare; de l'autre, de l'ammonium, $AzH^4$, corps instable, qui, à son tour, se décompose spontanément, quoique d'une façon progressive, en hydrogène et gaz ammoniac. Le problème de chimie qui consisterait à reconstituer ce radical ammonium, à partir de ses éléments: hydrogène et ammoniac, ne paraît pas susceptible d'une solution directe.

L'atome radioactif est assimilable ainsi à un composé chimique très peu stable, constamment à l'état de destruction spontanée, mais ne se détruisant pas d'un coup en une explosion spontanée. C'est une poudre qui se décompose lentement, qui donnerait, en éclatant, une énorme quantité d'énergie, mais que nous ne savons pas, jusqu'ici, faire éclater, et que nous prendrions pour une substance qui se conserve intacte, si certaines qualités de poudre ne nous présentaient une dissociation partielle révélatrice.

Nous comparons l'atome à un composé *très peu stable*. C'est bien le mot qui convient, plutôt que celui d'*instable*. Entre les fragments constitutifs de l'atome, il y a équilibre dans une position qui comporte stabilité, mais non pas le maximum de stabilité.

Il existe des lacs de montagne à 1.100 mètres d'altitude; la nappe d'eau qu'ils renferment s'y trouve bien à l'état d'équilibre véritable, elle n'est pas du tout en *faux équilibre* comme un rocher sur une pente abrupte, où il n'attend qu'une impulsion pour tomber. Pour que l'eau du lac tombât, il faudrait un soulèvement du fond ou une rupture de la paroi : cet accident seul libérerait l'importante provision d'énergie gravifique que le lac contient.

Et lord Kelvin a bâti, sur cette donnée, un plan de l'atome radioactif : les corpuscules qui le constituent seraient normalement dans des positions d'équilibre

stable, mais dont ils ne devraient guère s'écarter pour être précipités dans des positions instables, et, de là, repoussés au loin. Dans les atomes ordinaires, la latitude des déplacements permis autour de la position d'équilibre stable serait beaucoup plus étendue que dans les atomes des métaux exceptionnels sur lesquels on a découvert la radioactivité.

Quoi qu'il en soit, si c'est bien l'atome lui-même qui possède à son intérieur l'énergie que libère la radioactivité, une question se pose : comment a pu s'y accumuler cette réserve formidable d'énergie? et d'où vient-elle?

M. Ch.-Ed. Guillaume a émis l'idée que, sous l'influence des pressions énormes qui règnent à l'intérieur du globe, ont pu se constituer les atomes radioactifs, tels que ceux de l'uranium et du radium[1].

Cette mystérieuse énergie potentielle gravifique, — due à l'attraction universelle de la matière pour la matière, — sur laquelle nous n'en savons pas aujourd'hui beaucoup plus long qu'à l'époque de Newton, nous avons l'habitude de penser qu'elle se dégrade immédiatement, lors de la constitution des astres et de la concentration de leur masse : c'est là l'hypothèse de Helmholtz et de lord Kelvin sur l'origine de la chaleur solaire. Mais il n'est pas impossible qu'une fraction de cette énergie de gravitation se conserve et soit mise en réserve sous forme d'énergie intraatomique. Nous ne nous rendons pas un compte exact de la façon dont les électrons, ou particules élémentaires d'électricité, ont pu être captés et fixés dans une position relativement stable : nous ne pouvons parler que de possibilités; en tous les cas, nous pouvons affirmer la *non-démonstration de la production de l'énergie utile que renferment les atomes, aux dépens d'énergie dégradée.* Si pareille démonstration se faisait

1. *Les états de la matière.* — *Revue générale des sciences,* 30 décembre 1907.

jamais, elle serait capitale, et, pour le moins, aussi intéressante que la réalisation authentique d'une génération spontanée. Jusqu'ici on ne l'a pas faite. Le principe de Carnot n'est en aucune façon établi, ni par raisonnement, ni par expérience, pour les molécules et les atomes intervenant par individus, et autrement que par grandes masses. A plus forte raison n'est-il nullement établi dans le cas où l'on s'adresse à des fragments d'atome. Il n'en est pas moins vrai que si le principe est, alors, incertain, ce n'est que par des suppositions absolument gratuites qu'on peut en concevoir la mise en défaut.

J.-J. Thomson a donné une forme ingénieuse à l'idée d'une opposition possible entre le principe de Carnot et le fait que la radioactivité serait une propriété générale de la matière.

Il a montré que les métaux alcalins, rubidium, alliage de potassium et de sodium, maintenus dans le vide pour éviter toute oxydation, et *dans l'obscurité absolue*, déchargent un électroscope chargé positivement. Ces métaux émettent donc des corpusculés négatifs, et, par suite, prennent pour eux-mêmes, s'ils sont isolés, une charge positive; cette propriété persiste pour les mêmes métaux pris à l'état gazeux. Voici comment le physicien de Cambridge l'a vérifié. On chauffe du sodium dans une bouteille où l'on a fait un vide très parfait; la partie la plus froide de la bouteille contient deux tubes de verre où sont scellés deux fils métalliques. Ces fils peuvent être reliés aux deux pôles d'une pile de 600 volts. En chauffant le fond de la bouteille, on vaporise le sodium, qui, en l'absence de pile, se condense également sur les deux fils. Si on établit les communications électriques, le sodium se dépose presque entièrement sur le pôle négatif. En intervertissant les communications des deux fils avec les deux pôles de la pile, on renverse l'effet.

Imaginons deux corps ayant cette propriété à des degrés différents : l'un est capable d'émettre beaucoup de corpuscules, l'autre en émet très peu ou point : tous deux sont enfermés dans une enceinte à température uniforme, et ils sont reliés électriquement. Il pourra s'établir de l'un à l'autre un flux de corpuscules susceptibles de produire du travail mécanique. Et l'on tirera ainsi de l'énergie utile d'un milieu dont la température initiale était uniforme. Le second principe de la thermodynamique serait ainsi en défaut, à moins que l'émission même des corpuscules d'électricité par un des métaux n'entraînât quelque modification de l'atome, analogue à celle que produit la lumière ultra-violette : on a constaté que l'émission provoquée par la lumière ultra-violette se ralentit au bout d'un certain temps, comme s'il y avait une « fatigue » du corps qui émet les corpuscules. Si cette fatigue ne se produit pas, dans le cas où les corps sont dans le vide et à l'abri de toute lumière, l'application du second principe de la thermodynamique peut, là comme ailleurs, mettre sur la voie de quelque phénomène nouveau. Et enfin, lors même qu'un tel phénomène compensateur ne se produirait pas, il ne serait point prouvé que le principe est en défaut, s'il est admis que l'énergie intraatomique de l'atome de sodium est de l'énergie de qualité supérieure. La libération progressive de cette énergie supérieure obéirait simplement aux lois des phénomènes chimiques de combustion lente : du fer humide en présence de l'air laissé dans un récipient à température uniforme y dégage de la chaleur en se transformant en rouille ; et l'égalité des températures en tous les points du milieu se trouve rompue sans que, par là, soit mis en défaut le principe de la dégradation. Pour pouvoir affirmer que le principe est en défaut, il faudrait prouver après coup que la rouille peut être désoxydée, et le fer réduit,

sans nouvelle dépense d'énergie utile. C'est ce qui n'a pas lieu pour le cas de l'oxydation lente du fer. C'est ce qui, pour le moins, n'a pas été démontré pour l'énergie intérieure de l'atome : elle n'a jamais été restaurée sans perte corrélative d'énergie utile.

Le radium, qui se détruit certainement beaucoup plus vite que les atomes des métaux usuels, se désagrège et dégage de la chaleur en même temps. Tandis qu'il se détruit du radium, il s'en reforme. L'uranium, qui se dissocie beaucoup plus lentement, donne probablement du radium : la moitié d'un morceau d'uranium isolé se transformerait en radium au bout de 600 millions d'années. Quant au radium, c'est d'abord de l'*émanation* qu'il dégage; puis celle-ci, dans ses transformations successives, produit une série de composés instables, qu'on a numérotés depuis le *radium A* jusqu'au *radium F*, et dans laquelle paraissent rentrer certains corps radioactifs, tels que le polonium, le radiotellure et le radioplomb. Le plomb lui-même serait-il un des derniers termes de cette série de transformations atomiques? et serait-il vrai que nous assistions au changement « en un plomb vil » d'un métal mille fois plus précieux que l'or pur? A vrai dire, nous ne le savons pas encore. Mais ce qui semble bien se dégager de tous ces travaux, c'est que *ces transformations successives se font toujours par dégradations successives d'énergie;* et que, comme l'eau du fleuve qui tombe d'un niveau supérieur à un niveau inférieur par une série discontinue de cascades, l'atome d'uranium subit des diminutions successives d'énergie utile en passant de sa forme primitive à sa forme finale, qui est peut-être celle d'atome de plomb. Toutes ces transformations se produisent toujours dans le même sens. Il y a un ordre dans lequel se succèdent les phénomènes, jamais ils ne se passent dans l'ordre inverse. Ceux qui sont assez

« gros » pour qu'on les puisse suivre au calorimètre ressemblent aux réactions chimiques spontanées : ils sont exothermiques.

Nous sommes donc allés très loin dans l'analyse des corps matériels. Non contents de mesurer et de peser les molécules, nous avons atteint l'atome chimique : nous avons pénétré sa structure, nous y avons discerné des parties distinctes, nous y avons reconnu des particules électrisées, les unes positives, les autres négatives. Peut-être quelque jour poussera-t-on l'analyse encore plus loin. Mais il est à croire que, pour quelque temps, on s'en tiendra là ; et que, tout au moins sur ces *discontinuités de l'éther* que sont les *électrons* ou dernières particules d'électricité négative, notre puissance de dissolution n'aura plus de prise. De ces particules élémentaires qui seraient les matériaux ultimes avec lesquels serait construit notre monde matériel, nous pourrions espérer faire des édifices dont l'architecture serait tout autre, et qui n'obéiraient plus aux règles ordinaires de notre physique. Si, déjà, il est certain qu'en prenant un à un les atomes individuels, et en les maniant avec les doigts de fée du démon de Maxwell, on pourrait les trier assez adroitement pour refaire avec de l'énergie de déchet de l'énergie bonne à quelque chose, — à plus forte raison, en choisissant dans les matériaux qui sont entrés dans la structure de l'atome, devrions-nous pouvoir les engager en des combinaisons nouvelles qui permettraient la restauration de l'énergie utile.

Encore une fois, nous ne pouvons pas dire que ce soit là un rêve absurde, *mais aucun fait n'est jusqu'ici venu nous autoriser à le regarder comme confirmé.*

## § 4. — VIE DE LA MATIÈRE ET DÉGRADATION.

« La vie de la matière, a-t-on dit quelquefois, peut nous offrir des phénomènes inattendus qui contredisent la loi de dégradation. »

La comparaison de la matière « brute » à la matière vivante, de la molécule à la cellule, poursuivie dans le détail, parfois avec beaucoup d'art et de vérité, par des savants tels que Bose et M. Houllevigne, implique l'idée que la molécule, l'atome lui-même naissent et meurent: qu'il y a chez eux des alternances de progrès dans la croissance et de phénomènes régressifs.

Nous ne voudrions pas abuser nous-même de cette comparaison. Mais nous ne pouvons nous défendre d'observer que, dans la vie de l'être animé, — qu'il soit une simple cellule ou un animal supérieur, — il se passe une succession de phénomènes qui tous sont régis par les lois générales qui dominent la physique. Dans la naissance, dans le développement, dans la nutrition, il y a des réactions chimiques qui satisfont à la loi de dégradation. Dans la désassimilation, dans la maladie et dans la mort, il y a des réactions chimiques qui satisfont également à la même loi de dégradation. Le double rythme, décrit par Spencer, des faits de différenciation et des faits de retour à l'homogénéité, se retrouve, non seulement dans la vie du plus élémentaire des êtres, mais même dans le plus simple des changements d'état physique; et ce double rythme est réglé par la condition d'entraîner, dans l'une et dans l'autre de ses phases, dans la différenciation aussi bien que dans le retour à l'homogène, une dégradation d'énergie.

Si donc on escompte les phénomènes de la vie de la matière, de la naissance, de la transmutation et de la mort des atomes, pour y trouver des faits qui

contredisent la dégradation de l'énergie, — il est très possible en effet qu'un instinct très sûr guide ceux qui pressentent dans l'inconnu de ces forces mystérieuses une source inépuisable de « puissance motrice ». Mais il faut prendre garde qu'en attribuant ainsi à la *vie de la matière* la faculté de n'être pas régie par la loi de dégradation, on attribue par là même à la matière, pour laquelle on repousse l'épithète de « brute » et que l'on entend rapprocher plus étroitement que jamais de l'être vivant, un privilège qui n'appartient nullement à l'être vivant lui-même.

# TROISIEME PARTIE

## HISTOIRE D'UN PRINCIPE ET D'UN MOT

---

## CHAPITRE XVI

## Les aspects successifs du principe de Carnot.

---

### § 1. — SADI CARNOT ET LA PUISSANCE MOTRICE RÉSULTANT D'UNE RUPTURE D'ÉQUILIBRE.

L'idée fondamentale qu'exprime le second principe de la science de l'énergie a revêtu plusieurs aspects successifs. Dans les chapitres qui précèdent, on en a exposé les applications en se plaçant surtout, comme l'indiquait le titre même, au point de vue des physiciens de la Grande-Bretagne. Il ne sera pas sans intérêt de revenir sur le développement historique du principe.

Il peut se résumer en trois phases: Carnot reconnait que l'impossibilité du mouvement perpétuel implique la nécessité d'une rupture d'équilibre pour la production d'une puissance motrice. Clausius énonce le principe de l'équivalence des transformations. Enfin les physiciens anglais distinguent l'énergie utilisable de l'énergie, et affirment la disparition des formes utiles de l'énergie. Nous rappellerons, en der-

19.

nier lieu, dans quelles circonstances le mot même d'*énergie* fut introduit dans la science.

Dans son opuscule « sur la puissance motrice du feu[1] », Sadi Carnot s'exprime ainsi :

« La production de la puissance motrice est donc due, dans les machines à vapeur, non à une consommation réelle du calorique[2], *mais à son transport d'un corps chaud à un corps froid*, c'est-à-dire à son rétablissement d'équilibre, équilibre supposé rompu par quelque cause que ce soit, par une action chimique, telle que la combustion, ou par toute autre. Nous verrons bientôt que ce principe est applicable à toute machine mise en mouvement par la chaleur.

« D'après ce principe, *il ne suffit pas, pour donner naissance à la puissance motrice, de se procurer de la chaleur. Il faut encore se procurer du froid; sans lui, la chaleur serait inutile.* Et, en effet, si l'on ne rencontrait autour de soi que des corps aussi chauds que nos foyers, comment parviendrait-on à condenser la vapeur? Où la placerait-on une fois qu'elle aurait pris naissance? Il ne faudrait pas croire que l'on pût, ainsi que cela se pratique dans certaines machines, la rejeter dans l'atmosphère : l'atmosphère ne la recevrait pas.

« Partout où il existe une différence de température, partout où il peut y avoir rétablissement d'équilibre du calorique, il peut y avoir production de puissance motrice. La vapeur d'eau est un moyen de réaliser cette puissance, mais elle n'est pas le seul[3]. »

Et plus loin :

« On a remarqué plus haut ce fait évident par lui-même, ou qui du moins devient sensible dès que l'on réfléchit aux changements de volume occasionnés

1. Paris, Bachelier, 1824. — Réimprimé dans les *Annales de l'École normale supérieure,* 2ᵉ série, t. I.

2. C'était là l'affirmation erronée.

3. *Ann. Ec. Norm.* 2ᵉ série, I, p. 398, 399.

par la chaleur : *partout où il existe une différence de température, il peut y avoir production de puissance motrice.* Réciproquement, partout où l'on peut consommer de cette puissance, il est possible de faire naître une différence de température, il est possible d'occasionner une rupture d'équilibre dans le calorique. La percussion, le frottement des corps, ne sont-ils pas, en effet, des moyens d'élever leur température, de les faire arriver spontanément à un degré plus haut que celui des corps environnants, et par conséquent de produire une rupture d'équilibre dans le calorique, là où existait auparavant cet équilibre? C'est un fait d'expérience que la température des fluides gazeux s'élève par la compression et s'abaisse par la raréfaction. C'est là un moyen certain de changer la température des corps et de rompre l'équilibre du calorique autant de fois qu'on le voudra avec la même substance. La vapeur d'eau, employée d'une manière inverse de celle où on l'emploie dans les machines à vapeur, peut ainsi être regardée comme un moyen de rompre l'équilibre du calorique[1]. »

Cette remarque était si profondément juste que l'on a construit depuis lors, sur ce modèle, la machine frigorifique qui était la plus courante avant l'invention de l'air liquide : la machine à ammoniac liquide, qui n'est qu'une machine à vapeur renversée. Le déséquilibre du calorique est produit ici moyennant une dépense de travail utile.

En associant une machine qui fonctionne dans le sens ordinaire et une machine fonctionnant en sens inverse, Carnot crée ce type de raisonnement, « chef-d'œuvre de simplicité, ...et premier exemple d'un raisonnement de dynamique générale débarrassé d'un appareil mathématique toujours inutile[2] », par lequel il

1. *Loc. cit.*, p. 401.

2. G. Mouret, *Sadi Carnot et la Science de l'énergie. — Rev. gén. des sciences*, 1892, p. 469.

démontre que deux machines, utilisant des agents différents, d'ailleurs quelconques, si elles sont toutes deux parfaites et si elles fonctionnent entre les mêmes températures, produisent nécessairement la même puissance motrice; car, s'il en était autrement, il suffirait d'associer à l'une de ces machines l'autre machine renversée, pour réussir à tirer de la puissance motrice de rien.

Le raisonnement de Carnot supposait l'indestructibilité du calorique. Ou plutôt il était écrit dans la langue scientifique en usage au moment où l'on pensait encore que le calorique se conservait.

« Quand on s'aperçut, dit M. H. Poincaré, que la chaleur n'est pas indestructible, mais qu'elle peut être transformée en travail, on abandonna complètement les idées de Carnot; puis Clausius y revint et les fit définitivement triompher. La théorie de Carnot, sous sa forme primitive, exprimait, à côté des rapports véritables, d'autres rapports inexacts, débris de vieilles idées; mais la présence de ces derniers n'altérait pas la réalité des autres. Clausius n'a eu qu'à les écarter comme on émonde des branches mortes[1] ».

M. G. Mouret, le traducteur de la *Theory of Heat* de Maxwell, est allé beaucoup plus loin dans l'appréciation du mérite de Carnot. Très judicieusement, il a fait voir que l'on pourrait énoncer et démontrer ce qui fait le fond du théorème de Carnot sur les machines thermiques, — à savoir *la constance du rendement d'une machine parfaite fonctionnant entre deux températures données*, quel que soit l'agent employé; — et cela sans invoquer ni l'hypothèse inexacte de l'*indestructibilité de la chaleur*, comme l'a fait Carnot, — ni, au contraire, l'hypothèse exacte de l'*équivalence de la chaleur et du travail*, comme l'a fait Clausius.

1. Rapports présentés au Congrès international de physique, réuni à Paris en 1900, t. I, p. 18.

Cette remarque n'enlève rien à la *portée historique* de l'œuvre de Clausius, à qui reste l'honneur d'avoir concilié les deux principes de la Thermodynamique, qui, avant lui, paraissaient contradictoires, et que Mayer, en particulier, avait déclarés incompatibles. Mais elle diminue la *portée logique* de cette œuvre de Clausius, en faisant voir qu'il n'a pas suffisamment mis en lumière ce qu'il y avait de plus général, — et aussi de plus génial, — dans la doctrine de Sadi Carnot.

C'est en reprenant cette doctrine même de Carnot, du *déséquilibre nécessaire à la création de puissance motrice, ou, réciproquement, résultant d'une dépense de puissance motrice*, que M. Le Chatelier a été conduit à l'énoncé de ses lois du *déplacement de l'équilibre*. Et c'est cette doctrine du rôle du déséquilibre qui reste profondément vraie, quelle que soit l'hypothèse, vraie ou fausse, qu'on adopte sur la chaleur : conservation du calorique, ou équivalence de la chaleur et du travail.

## § 2. — CLAUSIUS ET L'ÉQUIVALENCE DES TRANSFORMATIONS.

L'œuvre de Clausius nous est mieux connue que celle de Sadi Carnot lui-même. Cependant, s'il a dégagé le principe de Carnot des idées inexactes qui y étaient mêlées, et s'il en a donné un énoncé indépendant de la considération spéciale du cycle de Carnot, il a introduit dans la science une notion « prodigieusement abstraite » : celle de l'*entropie*, très féconde à coup sûr, mais qui est, au moins en apparence, plus difficilement accessible à l'intelligence que celle de l'*énergie*. Et comme c'est de Clausius qu'en Allemagne et en France on s'est inspiré, de préférence, dans l'exposé de la seconde loi de la Thermodynamique, on a usé et peut-être abusé, pour une exposition élémentaire, de cette notion très difficile

d'*entropie* — dont nous rappellerons dans un instant la définition. — C'est certainement là une des raisons pour lesquelles le second principe a eu tant de difficultés à pénétrer dans les esprits.

Dans mon *Cours élémentaire d'électricité*[1], en un appendice relatif à la théorie thermodynamique de la pile, j'ai rappelé que, si Clausius a donné au principe qu'il continue à appeler *principe de Carnot*, divers autres noms, et en particulier le nom de *principe de l'augmentation de l'entropie*, il l'a exposé aussi sous un nom qui n'est pas suffisamment connu, de *principe de l'équivalence de transformations.*

Le premier principe de la thermodynamique étant le principe de l'équivalence de la chaleur et du travail, — « Hauptsatz der Æquivalenz der Wârme und der Arbeit » — le second serait le principe de l'équivalence des transformations, — « Hauptsatz der Æquivalenz der Verwandlungen ».

Les transformations d'énergie qui se font dans la nature ne sont pas également aisées dans les deux sens. Les unes sont *naturelles*, les transformations inverses peuvent être dites *artificielles.* Sont naturelles : la transformation du travail, celle de l'énergie électrique en chaleur. Au contraire, la transformation de la chaleur en travail est une *transformation artificielle*, qui n'est jamais intégrale : dans la machine à vapeur, une fraction seulement de la chaleur de la chaudière est transformée en travail.

Clausius examine un autre type de transformation d'énergie : *c'est le simple passage de chaleur d'un corps à un autre à température différente.* Ce passage peut s'opérer par rayonnement, par conductibilité ou par convection. Le passage de cha-

1. B. Brunhes. *Cours élémentaire d'Électricité. Lois expérimentales et principes généraux. Introduction à l'Électrotechnique.* Paris, Gauthier-Villars, 1895.

leur d'un corps chaud à un corps froid est manifestement une transformation naturelle. Le passage inverse de chaleur prise à un corps froid pour la reporter sur un corps plus chaud, est une transformation artificielle d'énergie : c'est celle que réalisent les appareils producteurs de froid.

Répétons qu'une pareille transformation n'entraîne ni création ni destruction d'énergie : *et pourtant elle ne se fait pas toute seule.* Admettons que nous ayons un appareil frigorifique qui contienne actuellement un million de *frigories* ou de *calories négatives;* c'est-à-dire que l'appareil est capable de soustraire de la chaleur à des objets qu'on y introduira, jusqu'à concurrence de un million de calories. Admettons que nous ayons un peu plus loin une chaudière avec de l'eau chaude représentant, au-dessus de la température ordinaire, une réserve de un million de calories (ce pourra être, par exemple, 10 tonnes d'eau à 100 degrés). Mettons cette eau dans l'appareil frigorifique. Il y aura compensation exacte, et le tout reviendra à la température ordinaire. L'eau chaude se sera refroidie, et l'appareil frigorifique se sera réchauffé. Il n'y a, dans cette opération, aucune destruction d'énergie calorifique : il n'y a ni perte d'énergie, ni perte de chaleur; dira-t-on que *rien* ne s'est perdu? Et sera-t-il aisé de réchauffer la chaudière et de refroidir le frigorifique? On fera cette double opération, à coup sûr, sans avoir aucune dépense d'*énergie* à faire; il y aura tout de même à *dépenser* quelque chose, car l'opération ne se fera pas toute seule : c'est une *transformation artificielle.*

La transformation d'énergie mécanique en énergie électrique, ou inversement, est une transformation indifférente : elle peut se faire avec une égale facilité dans l'un ou l'autre sens, avec un bon rendement, qui est sensiblement le même, quand la dynamo est générateur ou quand elle est moteur. C'est ce que

nous avons exprimé, dans le langage de Helmholtz, en disant que l'énergie électrique est de l'énergie équivalente en qualité à l'énergie mécanique, ou de l'énergie entièrement « libre ».

On peut donc classer en deux catégories toutes les transformations d'énergie ; dans l'une les transformations naturelles : transformation d'énergie mécanique en chaleur, — d'énergie électrique en chaleur, — d'énergie chimique libre en chaleur, et enfin : transformation de chaleur passant d'un corps chaud sur un corps froid. Dans l'autre catégorie, on rangera les transformations inverses des précédentes : transformation de chaleur en travail, ou encore en énergie électrique, ou encore en énergie chimique libre, ou enfin passage de chaleur d'un corps froid sur un corps chaud. Les premières transformations sont les transformations que Clausius appelle positives : le terme « naturelles » me semble mieux faire image. Les transformations de la seconde catégorie sont les transformations négatives ou artificielles. Le principe de Carnot, sous la forme que lui a donnée Clausius, est celui-ci :

*Une transformation artificielle ne peut jamais être produite que moyennant une transformation naturelle au moins équivalente.*

Exemple : on veut transformer de la chaleur en travail ; on devra ailleurs transformer du travail ou de l'énergie électrique en chaleur, ou bien encore consentir un passage de chaleur d'un corps chaud sur un corps froid. C'est à cette solution qu'on s'arrête dans la machine à vapeur.

Autre exemple : la machine frigorifique à ammoniaque liquide emprunte de la chaleur à de l'ammoniaque liquide refroidi, pour reverser cette chaleur dans le milieu ambiant ; on compense cette transformation artificielle par la transformation naturelle qu'on produit en dépensant, pour actionner la machine, du travail qui se convertit en chaleur.

Si une transformation naturelle et une transformation artificielle, numériquement équivalentes, peuvent se produire en même temps, elles sont, en quelque sorte, la caution l'une de l'autre, et le phénomène constitué par l'ensemble des deux est possible dans n'importe quel sens. Mais, en pratique, il arrive toujours que la transformation naturelle dépasse l'autre ; la transformation artificielle est plus que compensée, et il existe dans tout phénomène réel, se passant dans la nature, *un excès de transformations naturelles non compensées*. Il y a une prédominance inéluctable et incontestable des transformations naturelles sur les autres.

S'il nous arrive de rencontrer une transformation artificielle dans la nature, il n'est pas difficile de trouver la transformation naturelle qui la compense, *et la réciproque n'est pas vraie.*

C'est dans l'énoncé quantitatif des conditions auxquelles deux transformations sont équivalentes, que s'introduit la notion d'*entropie*. On peut appeler *valeur de transformation* d'une énergie calorifique prise à température donnée, le quotient de cette énergie par la température absolue à laquelle elle est prise. 500 calories à 100 degrés centigrades ont une valeur de transformation de $\frac{500}{373}$ ou 1,340 ; à 0 degré, elles ont une valeur $\frac{500}{273}$ ou 1,831. En tombant de 100 degrés à zéro degré, une quantité de chaleur voit croître sa *valeur de transformation*. 500 calories, en subissant cette modification, augmentent de 0,491 leur valeur de transformation. Dans les transformations naturelles, la *valeur de transformation augmente*.

Pour calculer la valeur de transformation d'une autre forme d'énergie, il faut se rappeler qu'une énergie de qualité supérieure est équivalente en qua-

lité à une énergie calorifique à température infinie.

La quantité dont s'accroît la valeur de transformation peut être prise pour définition de l'augmentation d'*entropie*. L'entropie d'un système n'est définie, comme l'énergie, qu'à une constante près : c'est la somme de toutes les variations qu'a subies la *valeur de transformation* d'un système quand on a passé d'un état primitif donné à l'état actuel. L'entropie, ainsi définie, augmente par les transformations naturelles et diminue dans les transformations artificielles. Elle ne peut, au total, qu'augmenter dans un système isolé. Mais cette notion d'entropie est bien délicate[1]. Elle est, a dit M. H. Poincaré, « prodigieusement abstraite », et il y a tout avantage à faire sentir, sans l'invoquer, en quoi consiste l'*équivalence des transformations*.

Clausius a essayé de rattacher ce principe de *l'équivalence des transformations* à une proposition plus simple, dont l'évidence fût plus immédiate. C'est à cette proposition qu'on a donné le nom de postulat ou d'axiome de Clausius ; elle peut s'énoncer ainsi : « On ne peut, ni directement ni indirectement, faire passer de la chaleur d'un corps froid sur un corps chaud, dans un système de corps auquel on ne fait subir par ailleurs aucune autre transformation. » C'est cet énoncé qui donna lieu, à l'origine, à maintes

1. Il est arrivé à Tait de se tromper sur la signification du mot *entropie :* ce qu'il appelle entropie, c'est bien la quantité que Clausius appelle entropie, *mais changée de signe*, de sorte que Tait parle de diminution de l'entropie là où Clausius parle d'augmentation d'entropie et où il y a diminution de l'énergie utilisable. L'erreur vient sans doute de ce que Clausius traite comme la *valeur de transformation*, juste le *contraire* de ce que Tait nomme, — beaucoup plus justement, — la *valeur* d'une forme d'énergie.

Ces remarques sont utiles au lecteur qui voudrait lire successivement des traductions de Clausius et de Tait. Elles montrent à quel point l'on est bien inspiré en évitant, dans une exposition élémentaire, la notion d'entropie.

objections, et qu'il faudrait à tout le moins entourer de restrictions et de distinctions convenables pour qu'il fût absolument rigoureux.

Mais on peut lui donner une forme un peu différente qui a l'avantage de rappeler de plus près les idées mêmes de Carnot. On peut dire qu'il est impossible de faire fonctionner une machine thermique produisant du travail en ne disposant que d'une seule source de température. Ou encore qu'il ne se peut pas que, dans un système isolé, tous les autres corps ayant repris leur état initial, un seul corps n'ait fait que se refroidir, sans autre changement, et en produisant du travail.

C'est sous cette dernière forme que l'axiome fut énoncé par W. Thomson ; et nul doute qu'elle ne soit préférable à la forme de Clausius.

Si l'on pouvait arriver, en effet, à provoquer une différenciation des températures dans un système clos, à température uniforme, sans le compenser par une transformation naturelle, on aurait pratiquement réalisé le mouvement perpétuel.

Ce qu'on appelle *problème du mouvement perpétuel*, dans l'histoire de la mécanique, ce n'est pas précisément la réalisation d'une horloge qui marcherait indéfiniment une fois remontée, ou d'un pendule qui oscillerait sans s'arrêter sous un globe qui le soustrairait à l'action des courants d'air ; c'est la construction d'une machine qui fournirait du travail, sans qu'on eût besoin de dépenser du travail pour la faire marcher, ou tout au moins qui rendrait plus de travail qu'elle n'en absorberait pour fonctionner.

Il a pu paraître possible à quelques esprits ingénieux, qu'un dispositif permît, avec une puissance de 8 chevaux, par exemple, d'actionner une machine donnant 10 ou 12 chevaux ; il a pu ne pas sembler absurde que la machine, une fois mise en marche,

parvînt à tromper la vigilance de la nature et à lui imposer une surcharge qu'elle portât comme sans en sentir le poids. Résoudre ce problème serait, au sens rigoureux du mot, *créer* de l'énergie, la tirer de rien.

Qu'on ne se méprenne pas sur le sens de cette expression. Lorsque nous empruntons l'énergie aux sources d'énergie que nous fournit la nature, les chutes d'eau ou le vent, nous alimentons nos machines à un réservoir où l'on puise gratuitement, mais nous ne faisons en cela que recueillir l'énergie qui nous est offerte; nous n'en créons pas.

Capter les énergies naturelles disponibles, ce qui est le grand problème de l'industrie moderne, c'est faire œuvre utile, mais ce n'est pas plus créer de l'énergie, que la captation d'une source pour l'alimentation d'une ville n'est une création d'eau.

Ce n'est pas non plus créer de l'énergie, c'est en transformer, que de produire du travail moyennant une dépense de chaleur, comme dans la machine à vapeur. On consomme de la chaleur prise à haute température, et on en tire une partie du travail mécanique auquel elle équivaut.

A haute température, disons-nous. Pourquoi ne pas tenter de transformer en travail de la chaleur prise à des corps qui sont à la température ordinaire? Nous sommes à la température de zéro, par exemple; enlevons encore de la chaleur à des corps qui sont à zéro degré; par là nous rendons disponibles des calories; qui nous empêche de les transformer en travail mécanique? Ce travail permettrait d'actionner des machines-outils, des dynamos qui, presque toujours en définitive, aboutissent à rendre en chaleur, par frottements, par chocs, par incandescence de filaments lumineux, le travail qu'on a dû dépenser pour les faire marcher. Cette chaleur restituée, retombant sur la glace refroidie, lui rendrait la température pri-

mitive, et tout rentrerait dans l'ordre, non sans nous avoir permis de faire œuvre utile.

C'est ce que la nature nous interdit. Ce ne serait pourtant pas là le mouvement perpétuel au sens précédent et primitif du mot. En empruntant de la chaleur à de la glace et en la refroidissant pour reporter cette chaleur, par l'intermédiaire d'une machine électrique, sur un filament de charbon, et l'amener au rouge blanc, nous ne créons pas de chaleur, nous ne créons pas d'énergie, nous ne tirons pas quelque chose de rien. Qui ne voit, cependant, que ce serait là l'équivalent pratique du mouvement perpétuel proprement dit?

Des boules de neige ont en elles une certaine quantité de chaleur, puisqu'il est possible de les refroidir. De cette chaleur que contiennent les boules de neige, on ne pourra pas, cependant, se servir pour chauffer un four. Diderot, dans une boutade, l'avait déjà dit. La tendance à l'égalisation des températures est la tendance naturelle : quand l'homogénéité des températures est obtenue dans un système clos, il ne se produit plus rien. On ne saurait par aucun procédé, direct ou indirect, y prendre de la chaleur en un point pour la porter sur un autre point. On ne saurait le faire, à moins toutefois de faire intervenir un agent extérieur qui compense, par une équivalente dégradation d'énergie, cet accroissement d'énergie utilisable. D'un ensemble de corps composant un système clos et à température uniforme, on ne peut tirer aucun travail : non seulement on ne peut faire apparaître en ce système une énergie qui serait tirée de rien, ce qui serait contraire à la conservation de l'énergie, mais encore l'énergie calorifique qu'il renferme ne peut être en aucune façon transformée en énergie d'une autre nature, *énergie mécanique ou électrique*, elle n'est pratiquement bonne à rien. Remarquons que l'air comprimé n'échappe pas à cette règle :

en système clos, une masse isolée de gaz comprimé peut se détendre ; elle se refroidit et produit du travail. Mais la masse gazeuse n'est pas, alors, revenue à son état initial, puisque sa pression a diminué. Ce qui est impossible, c'est que cette masse *ramenée à son état de compression primitif* se soit, au total, refroidie et ait produit du travail, sans quelque autre transformation naturelle compensatrice.

Si j'énonce la seconde loi de la thermodynamique sous cette forme qui fait intervenir la considération d'un système clos à température uniforme, c'est parce que c'est précisément sous cette forme — particulièrement sous la forme donnée à l'axiome de Clausius par sir W. Thomson — que le principe de Carnot et de Clausius s'est montré, en ces dernières années, particulièrement fécond. Il importe, en effet, de ne pas voir simplement dans la seconde loi de la thermodynamique la conclusion d'une série de remarques suggérées par la physique, bonne à servir de point de départ à des spéculations de métaphysiciens. Cette seconde loi que, faute d'habitude intellectuelle, une foule de gens s'obstinent encore à ne pas regarder comme aussi bien fondée que la première, a permis de classer en un ensemble harmonieux une série de faits et de lois, en des parties de la physique jusque-là vouées au désordre ; elle a conduit à la découverte de faits essentiels jusque-là insoupçonnés. On en a donné des exemples éclatants en étudiant cette forme spéciale d'énergie qu'est la lumière. Citons encore un exemple emprunté à un chapitre de la physique tout différent :

Dans un tube de diamètre très étroit, dans un tube *capillaire*, l'eau s'élève au-dessus du niveau qu'elle a dans un vase large, et sa surface, au lieu d'être plane, est courbe ; elle forme ce qu'on appelle un ménisque, qui est concave vers le haut. Enfermons dans une caisse vide d'air un vase large plein d'eau, au milieu duquel plonge un tube capillaire : la

tension de vapeur de l'eau sera-t-elle identique à la surface plane de l'eau dans le vase, et à la surface courbe qui termine la colonne soulevée dans le tube capillaire ? non, dit lord Kelvin, car, s'il en était ainsi, la vapeur formée en haut de la colonne capillaire retomberait et viendrait se condenser dans le vase large, tandis qu'une évaporation se produirait dans le tube ; d'où refroidissement en haut du tube, et, par là, *établissement spontané d'une différence de température entre deux points d'un système clos primitivement à température uniforme.* La conclusion logique de l'hypothèse étant en contradiction avec l'axiome de Clausius ou de Kelvin, doit être rejetée : donc l'hypothèse elle-même est à rejeter ; donc il est impossible que la tension de vapeur de l'eau auprès d'une surface courbe, soit identique à la tension de vapeur auprès d'une surface plane, et la difference de tension pourra être calculée, quand on connaît la différence de courbure. De là la démonstration du fait que, dans une atmosphère saturée de vapeur d'eau, les premières gouttelettes ne pourront pas se former d'elles-mêmes dans une masse purement gazeuse, si elles n'ont, pour favoriser leur condensation, un noyau préalable sur lequel elles se déposent. Et de là l'explication du rôle des noyaux de condensation, c'est-à-dire des poussières, ou encore des centres électrisés, dans la formation des gouttes liquides au sein d'une atmosphère humide ; de là toute une série de conséquences que l'expérience a vérifiées jusque dans le détail, et qui ouvrent une ère nouvelle pleine de promesses aux recherches de météorologie et d'électricité atmosphérique.

Tous ces progrès, qui datent d'hier, justifient d'une manière frappante ce qu'écrivait Tait en 1884 :

« La « dissipation de l'énergie » n'a pas été bien

comprise et beaucoup de résultats qu'elle fournit ont été accueillis avec doute; quelquefois même on les a tournés en ridicule. Cependant, elle paraît être actuellement la partie de la physique la plus féconde, la plus riche en promesses[1] ».

Pour en revenir à l'œuvre propre de Clausius, son idée de *l'équivalence des transformations* suppose expressément démontrée au préalable l'équivalence de la chaleur et du travail. Fondée sur une supposition exacte, elle n'en reste pas moins inférieure en généralité à l'idée de Carnot qui, elle, garde son prix indépendamment de la valeur de cette supposition.

### § 3. — LES PHYSICIENS ANGLAIS ET LA DISPARITION DES FORMES UTILISABLES DE L'ÉNERGIE.

Pendant que Clausius élaborait ainsi son œuvre plus correcte, mais, à certains égards, moins profonde que celle de Carnot, Sir William Thomson, méditant aussi les idées de Carnot, en tirait tout d'abord la notion de température absolue : le rendement d'une machine thermique idéale fonctionnant entre deux sources de chaleur, ayant entre elles un certain écart de température, ne dépend que des deux températures : il peut fournir une mesure absolue de leur intervalle. Et un peu plus tard, cherchant à énoncer en langage ordinaire les conséquences qui se dégagent des travaux de Carnot et de Clausius, il formulait ces trois propositions célèbres :

« 1. — Il y a actuellement, dans le monde matériel, une tendance universelle à la dissipation de l'énergie mécanique;

« 2. — Toute restauration de l'énergie mécanique qui ne serait pas plus que compensée par son équivalent de dissipation, est impossible dans les phénomènes que présente la matière inanimée, et proba-

1. *Conférences*. Trad. Krouchkoll., p. 32.

blement n'est jamais effectuée non plus par le moyen de la matière organisée, que celle-ci soit enfermée dans la vie végétale ou soumise à la volonté d'une créature animée ;

« 3. — La terre doit avoir été dans le passé, à une époque séparée de nous par un temps fini, et sera dans l'avenir, à une époque séparée de nous par un temps fini, impropre à l'habitation de l'homme tel qu'il est constitué à présent, à moins que des opérations n'aient eu lieu ou ne soient destinées à être accomplies, qui sont impossibles sous l'empire des lois auxquelles sont soumises les opérations connues qui ont lieu actuellement dans le monde matériel. »

Ce qu'on en a pu déduire sur l'origine et la fin de l'univers matériel, nous n'en dirons rien pour l'instant. Dans une conférence faite en 1854, à Kœnigsberg, par Helmholtz sur les transformations réciproques des forces naturelles, *Ueber die Wechselwirkung der Naturkräfte*, conférence qui est malheureusement moins connue que son opuscule célèbre de 1847, sur la *conservation de la force* [1], « *Ueber die Erhaltung der*

1. Nous disons aujourd'hui « de l'énergie ». Avant que le vocabulaire fût encore complètement fixé, on employait assez souvent le mot « force » dans le sens où nous employons aujourd'hui le mot « énergie ». Ainsi qu'on l'a indiqué avec détails au chapitre II la première idée de l'énergie a été suggérée par l'énergie mécanique, et une quantité d'énergie de forme quelconque peut toujours être évaluée en *travail* : or le *travail* est une grandeur qui est un produit, dont la *force* n'est qu'un des facteurs ; pour qu'il y ait travail réel accompli, il faut qu'il y ait *une force dont le point d'application se déplace* ; et le travail est le produit du déplacement par l'intensité de la force. Un travail ou une énergie est donc autre chose qu'une force. Mais le sens de ce dernier mot n'a été précisé et restreint qu'à une époque relativement récente, et, dans les écrits qui datent de cinquante ans, on trouve encore assez souvent les termes « la force » ou « die Kraft » employés pour « l'énergie ». — Il nous est resté de l'époque où l'on confondait les mots *force* et *énergie*, l'expression *force vive* usitée encore aujourd'hui : la *force vive* est une *énergie*, c'est de l'énergie de mouvement; ce n'est pas une *force*.

*Kraft* », le célèbre physicien allemand admirait la pénétration de Thomson « qui, dans les équations de Carnot et de Clausius, avait su lire l'arrêt de mort de l'univers » ; mais, laissant de côté toute cette partie purement philosophique de l'œuvre de Thomson, il indiquait comme hors de conteste ce résultat mis en évidence par l'illustre physicien anglais : « de ce qu'aucune minime partie de force ne peut s'anéantir, on ne peut conclure qu'elle ne puisse rester stérile pour l'usage de l'homme ».

L'idée de la « dissipation » de l'énergie mécanique ou, d'une façon générale, de la dissipation des formes supérieures de l'énergie, est une idée bien plus accessible à l'esprit, non seulement que celle de l'*entropie*, mais peut-être même que celle des *transformations équivalentes* ou *compensées*.

Les contemporains et les élèves de lord Kelvin se sont plu à développer cette idée de « dissipation », en parlant trop souvent, d'une façon générale, de *dissipation d'énergie*, sans dire explicitement qu'il s'agit de *dissipation de l'énergie de forme supérieure*. Le terme de « dissipation de l'énergie » tout seul, qui est employé par Maxwell, par Tait, par Balfour Stewart, implique quelque contradiction avec le terme de *conservation de l'énergie*, et si la contradiction n'est pas dans les principes, il faut éviter de la mettre dans les mots.

Le petit *Traité de la chaleur* de Clerk Maxwell, qui est un chef-d'œuvre d'exposition élémentaire, et qui a été traduit en 1891 par M. Mouret sur la *huitième édition anglaise*, porte comme sous-titre : « *Leçons élémentaires sur la thermométrie, la calorimétrie, la thermodynamique et la dissipation de l'énergie* » (1).

1. J. Clerk Maxwell : *La Chaleur*, leçons élémentaires sur la thermométrie, la calorimétrie, la thermodynamique et la dissipation de l'énergie. Édition française, d'après la 8e édition anglaise, traduction Mouret. Paris, Tignol, 1891.

Cette importance donnée, dans le titre même de l'ouvrage, à une idée encore si peu familière chez nous, et le fait que l'ouvrage élémentaire en était, en 1891, à *sa huitième édition*, nous est une révélation de ce qu'est, sur cette question, l'opinion anglaise.

Balfour Stewart, aussi, parle de dissipation, et consacre à la « dissipation de l'énergie » presque un chapitre entier (sur six chapitres) de son livre sur la *Conservation de l'énergie.* Ce livre a eu trois éditions françaises, et il a contribué certainement à la vulgarisation en France du principe de la conservation : il a paru dans la Bibliothèque scientifique internationale. Les lecteurs dont ce livre a affermi la foi en la conservation de l'énergie se seraient-ils arrêtés au titre ? et ne soupçonneraient-ils pas le chapitre V, qui a pour titre : « Étude historique. Dissipation de l'énergie ? ».

Je cite quelques passages de ce chapitre :

« Thomson observa qu'il y avait entre ces deux lois (transformation de chaleur en travail, ou de travail en chaleur) une différence des plus importantes et des plus significatives; le travail se transforme en chaleur avec la plus grande facilité, mais il n'est pas de méthodes, au pouvoir de l'homme, permettant de transformer *toute* la chaleur en travail. Le phénomène n'est pas réciproque et il en résulte que l'énergie mécanique de l'univers se change chaque jour, de plus en plus, en chaleur. On voit aisément que, si le phénomène était réciproque, il ne serait pas impossible d'atteindre une forme de mouvement perpétuel. En effet, sans essayer de créer de l'énergie par une machine, il suffirait, pour obtenir un mouvement perpétuel, de trouver les moyens d'utiliser les vastes provisions de chaleur placées dans tous les corps qui nous entourent, et de les convertir en travail. »

Et plus loin :

« Il y a, par conséquent, quoique dans un sens

strictement mécanique, conservation d'énergie ; et cependant, *au point de vue de l'utilité et de l'intérêt des êtres vivants, l'énergie de l'univers est en voie de destruction*. La chaleur universellement diffusée constitue ce que nous pouvons appeler l'amas des matériaux de rebut de l'univers ; et cet amas s'augmente d'année en année. A l'époque actuelle, il n'a pas une grande importance, *mais qui peut assurer qu'il n'arrivera pas un temps où nous aurons pratiquement conscience de son accroissement*[1] » ?

On voit indiquée ici la distinction, qui marque un progrès bien net par rapport à la notion insuffisamment correcte de dissipation, entre l'*énergie totale* et l'énergie *utile*. Mais c'est à Maxwell, dans l'ouvrage précédemment cité, qu'on doit l'introduction de l'idée précise de l'*énergie utilisable*, « available energy » qui permettra d'énoncer le second principe, sous la forme de *principe de la diminution de l'énergie utilisable*. Voici ce qu'il dit, non pas en un passage ignoré de son livre, mais *à la première page* de ce livre *élémentaire* qui a eu, nous le répétons, huit éditions en Angleterre :

« La Thermodynamique repose sur la considération de l'énergie intrinsèque d'un système de corps, énergie qui est en rapport avec les températures et l'état physique des corps, aussi bien qu'avec leur forme, leur mouvement et leur position relative. Une partie seulement de cette énergie, cependant, est susceptible de produire un travail mécanique, et, bien que l'énergie elle-même soit indestructible, la partie utilisable tend à diminuer par l'action de certains procédés naturels, tels que la conduction et le rayonnement de la chaleur, le frottement et la viscosité. Ces phénomènes dans lesquels une partie de l'énergie est

1. BALFOUR STEWART : *La Conservation de l'énergie*. Paris, Germer Baillière, 1870, p. 157.

rendue inutilisable comme source de travail, sont classés sous le nom de phénomènes de dissipation de l'énergie et font l'objet de la division suivante du présent ouvrage ».

Il faut arriver à Tait pour voir employer, concurremment avec le terme de « dissipation de l'énergie » dont il continue à se servir, le terme nouveau de « dégradation de l'énergie ».

« La théorie de l'énergie, dit Tait, telle qu'elle est actuellement formulée, comprend sa conservation, sa transformation et sa dissipation ». Et voici comment il formule la *loi de dissipation* :

« Il résulte de là que, puisque l'énergie est dans un état incessant de transformation, il y a déperdition constante d'énergie, sous la forme finale et sans valeur de chaleur uniformément diffusée, et qu'il en sera ainsi tant que les transformations auront lieu, jusqu'à ce que toute l'énergie de l'univers ait pris cette forme dernière de chaleur dispersée et inutile[1]. »

La notion de « valeur » de l'énergie est déjà indiquée. Elle est plus nettement développée dans le passage suivant, emprunté à une des Conférences sur *les Progrès récents de la Physique* :

« Bien entendu, il y a toujours la même quantité d'énergie dans une quantité donnée de chaleur emmagasinée dans un corps, à quelque température qu'il soit ; car une quantité de chaleur, à quelque température qu'on la prenne, représente toujours son équivalent de travail.

« Néanmoins, son utilité varie beaucoup suivant les conditions. Si vous avez cette chaleur dans un corps très chaud, vous pouvez en utiliser une grande partie. Au contraire, si vous l'avez dans un corps re-

1. P. G. Tait : *Esquisse historique de la Théorie dynamique de la chaleur*. Traduction Moigno et Alfred Le Cyre. Paris, Gauthier-Villars, 1870.

lativement froid, vous ne pouvez en utiliser que très peu. Nous sommes ainsi amenés à parler de la valeur d'une certaine quantité d'énergie calorifique.

« La « valeur » de l'énergie est la capacité qu'elle possède de se transformer en quelque chose de plus utile, c'est-à-dire de s'élever plus haut dans l'échelle de l'énergie. Pour ce qui est de la chaleur, sa valeur dépend entièrement de la température à laquelle elle se trouve. Nous avons vu qu'une machine thermique, même parfaite, ne peut transformer en travail qu'une partie de la chaleur déployée. Nous avons tout le bénéfice de cette partie-là, mais l'autre partie de la chaleur mise en jeu n'est pas abandonnée à la chaudière : elle est dégradée, elle est tombée par toute la série des températures comprises entre celle de la chaudière et celle du condenseur, et elle ne peut plus être convertie en travail utile, quoiqu'elle soit encore équivalente à la même quantité de travail, que si elle avait été à une température supérieure. De plus, pour qu'une transformation puisse avoir lieu, il nous faudrait une nouvelle machine travaillant entre la température du condenseur et une température inférieure. Par conséquent, cette partie de la chaleur, quoique identique à l'autre au point de vue de l'équivalence à l'énergie mécanique, ne peut pas être utilisée, parce que nous n'avons aucun moyen de la transformer. Elle a, pour ainsi dire, perdu son rang : elle a perdu sa valeur. Il y a donc une tendance permanente à la dégradation de la plus grande partie de la chaleur employée, même dans une machine parfaite que nous ne pourrons jamais réaliser. »

Ce passage est l'un des premiers, à ma connaissance, où ait été employé ce mot de *dégradation* et, comme nous avons eu déjà l'occasion de le dire, s'il y a quelque apparence de contradiction à proclamer

tout à la fois que l'énergie se conserve et se dissipe, l'on conçoit mieux la réalité complexe que recouvre l'ensemble des deux principes de la science de l'énergie, quand on dit que, la quantité d'énergie totale restant invariable, cette énergie se dégrade et que, sans pourtant *se perdre*, elle passe de plus en plus à l'état d'énergie inutilisable et sans valeur. Et ce *troisième aspect* du principe nous paraît être, décidément, celui sous lequel il est le plus aisément accessible, en dehors des spécialistes, aux intelligences cultivées.

# CHAPITRE XVII

## L'histoire du mot « énergie ».

### § 1. — LA PREMIÈRE IDÉE DE L'ÉNERGIE POTENTIELLE ET LE PREMIER EMPLOI DU MOT ÉNERGIE.

Il est peu de mots dans la science dont la fortune ait été aussi rapide que celle du mot « énergie ». A peine introduit dans la langue scientifique, il est passé dans la langue courante. Mais, en dépit des affirmations de Rankine, qui se félicitait que le mot ne prêtât à aucune ambiguïté, il est passé dans la langue courante avec un sens un peu différent de celui que les savants lui avaient donné tout au début. De là l'équivoque, maintes fois dénoncée, mais persistante, qui consiste à entendre l'expression de « conservation de l'énergie » en un sens impliquant la conservation de ce que Carnot appelait « puissance motrice ». Cette équivoque, les savants qui ont les premiers usé du mot « énergie » ne l'ont pas toujours évitée et, avant le moment où ils sont arrivés à la notion claire d' « énergie utilisable », quelques-unes de leurs formules ont pu y donner prise.

Quoique l'introduction du mot « énergie » dans la science ne remonte pas à une époque très éloignée, bien peu d'ouvrages indiquent dans quelles circonstances, et avec quel sens, il fut employé pour la première fois. Il ne sera pas inutile de le rappeler.

Verdet, généralement bien informé, cite, dans ses leçons professées devant la Société chimique de Paris, en 1862, sur la « théorie mécanique de la chaleur » Rankine, comme l'auteur du mot « énergie[1] ». C'est à Rankine lui-même que nous demanderons une information plus exacte.

Dans le mémoire où il défend, devant la Société philosophique de Glasgow, son expression d'*énergie potentielle* contre les critiques de Sir John Herschel, Macquorn Rankine déclare qu'au commencement du siècle, « le mot *énergie* a été substitué par le docteur Thomas Young à celui de *vis viva*[2] pour désigner la *capacité de produire du travail* due à la vitesse acquise; et l'emploi du même mot, à une époque toute récente, a été étendu par sir William Thomson à une capacité, de quelque nature qu'elle soit, de produire du travail, — to capacity of any sort for performing work. — Il n'est pas douteux, ajoute Rankine, que le mot énergie ne soit tout spécialement adapté à cet objet; non seulement, sa signification est parfaitement d'accord avec l'étymologie : ἐνεργεια; mais le mot énergie n'a jamais été, dans des écrits scientifiques proprement dits, employé en différents sens, et ainsi tout danger d'ambiguïté est évité. Il m'est apparu, par conséquent, que ce qui restait à faire, était de doter le substantif *énergie* d'adjectifs appropriés pour distinguer entre l'énergie d'activité et l'énergie de configuration. Le couple d'adjectifs antithétiques bien connu : « actuelle » et « potentielle », m'a semblé exactement approprié à ce but; et, en conséquence, j'ai proposé les expressions « énergie actuelle » et « énergie potentielle » dans le mémoire auquel j'ai renvoyé.

1. VERDET. *Chaleur*, t. I, p. 11.

2. Les Anglais disent toujours « the vis viva » pour désigner la force vive. Les Allemands traduisent, comme nous, les mots latins en langue courante : die lebendige Kraft.

« J'ai été encouragé à persévérer dans l'emploi de ces expressions par le fait qu'elles ont été immédiatement approuvées et adoptées par Sir William Thomson; c'est là un fait auquel je suis porté à attribuer, dans une large mesure, la rapide extension de leur emploi au cours d'une période aussi courte dans l'histoire de la science que quatorze ans[1]. »

Tait, dans son *Esquisse de la théorie dynamique de la chaleur*, confirme ces renseignements, en les complétant sur un point. C'est à Lazare Carnot que l'on doit la première idée de donner un nom spécial à « l'énergie potentielle » qu'il appelait « force vive latente » :

« Le terme d'énergie est dû à Young, celui d'énergie potentielle à Rankine. L'idée d'énergie potentielle semble avoir été émise pour la première fois par L.-N.-M. Carnot, qui parle de la *force vive latente* (*Principes de l'Équilibre et du Mouvement*, Paris, 1803) — et par W. Thomson, qui l'appelle Énergie statique[2]. »

## § 2. — DÉFINITION DE L'ÉNERGIE D'UN CORPS, PAR SIR W. THOMSON.

Thomson lui-même, dans son grand mémoire sur la théorie dynamique de la chaleur, publié dans le *Philosophical Magazine* en 1862, indique en note qu'une certaine intégrale qui représente la quantité totale de travail qu'un fluide est capable de fournir, peut évidemment, — obviously, — être appelée « énergie mécanique de la masse fluide ». Il ajoute qu'il a, pour la première fois, fait usage de cette dénomination dans une communication à la Société Royale d'Edimbourg, le 15 décembre 1851.

1. *Philosophical Society of Glasgow*, 23 janvier 1867. — Rankine. *Scientific papers*, p. 229.

2. Tait. *Esquisse historique*. Traduction Moigno. Paris, Gauthier-Villars, 1870, p. 73.

Cette courte communication, qui n'est pas reproduite, sous sa forme originale, dans les « Mathematical and physical papers » de Sir W. Thomson, a pour titre : « Sur les quantités d'énergie mécanique contenues dans une masse fluide, à divers états définis par la température et la densité. »

Si on a fourni de la chaleur à un fluide, gaz ou vapeur, pour l'échauffer et le dilater, l'excès de cette chaleur, — évaluée en unités mécaniques (c'est-à-dire à raison de 425 kilogrammètres par grande calorie), — sur le travail produit par le fluide en se dilatant, — représente la valeur mécanique du travail dépensé sur le fluide, et par suite, du travail qu'il pourrait restituer. C'est cet excès de la chaleur fournie au fluide sur le travail qu'il a produit, dans le cas d'une modification élémentaire de la température et de la densité, que Sir W. Thomson définit comme la variation élémentaire de l'*énergie mécanique du fluide*[1].

Que le fluide vienne à décrire un cycle de transformations qui le ramène à son état initial, c'est-à-dire à sa température et à son volume initial, la chaleur totale qu'on a dû lui fournir est équivalente au travail qu'il a produit : c'est l'énoncé même du principe de l'équivalence de la chaleur et du travail. La somme

1. J'appelle $v$ le volume, $t$ la température. Si le volume varie d'une quantité infiniment petite $dv$, et la température de $dt$, la quantité de chaleur qu'il a fallu lui fournir est $Mdv + Ndt$. N est la chaleur spécifique à volume constant, M la chaleur de dilatation. L'équivalent mécanique de cette quantité de chaleur est $J(Mdv + Ndt)$, J étant l'équivalent mécanique de la calorie. Le travail qu'a fourni le fluide en se dilatant de $dv$ est $pdv$, $p$ étant la pression du fluide. La différence envisagée par Thomson est donc $J(Mdv + Ndt) - pdv$. Cette expression est la différentielle exacte d'une fonction de $v$ et de $t$, que Thomson désigne par $\varphi$.

$$\varphi(v, t) = \int (JM - p)\, dv + JN\, dt$$

et qui exprime, d'après lui, « la quantité absolue d'énergie mécanique contenue dans le fluide », si la constante d'intégration est convenablement fixée. (*Proc. R. S. Edinb.*, t. III, p. 90-91.)

algébrique des variations élémentaires de l'énergie mécanique est donc nulle, c'est-à-dire que l'énergie mécanique elle-même a repris la même valeur. L'énergie mécanique est donc entièrement définie par l'état actuel du fluide, et la variation de son énergie mécanique, quand il passe d'un état à un autre, est indépendante des états intermédiaires par lesquels s'est fait le passage.

Dans le grand mémoire où il a développé les idées simplement indiquées dans la communication à la Société royale d'Edimbourg, Thomson revient sur cette notion d'énergie mécanique contenue dans un corps à un état donné et, sans particulariser maintenant l'état fluide ou solide, dans lequel ce corps peut se trouver, il aborde la *définition générale de l'énergie :*

« L'énergie mécanique totale d'un corps peut être définie[1] comme la valeur numérique de tout *l'effet qu'il pourrait produire, en chaleur émise et en résistances vaincues*, s'il était refroidi à fond (cooled to the utmost) et amené à un état de contraction indéfinie ou d'expansion indéfinie, suivant que les forces qui agissent entre ses particules sont attractives ou répulsives, quand tous les mouvements thermiques sont arrêtés en lui. Mais, dans notre état actuel d'ignorance relativement au froid absolu, et à la nature des forces moléculaires, nous ne pouvons pas déterminer cette *énergie mécanique totale* pour une portion de matière, *et nous ne pouvons pas non plus être sûrs qu'elle n'est pas infiniment grande pour une portion de matière*. Donc il est convenable de choisir un certain état comme état de comparaison pour le corps dont il s'agit, et d'user, sans autre qualificatif, de ce terme d'*énergie mécanique*, en entendant par là que l'on se reporte à un état donné; de telle sorte que

1. *Math. and Phys. Papers*, I, p. 222.

« l'énergie mécanique du corps dans un état donné » désignera l'équivalent mécanique des effets que le corps pourrait produire en passant de l'état où il se trouve, à l'état initial, — ou la valeur mécanique de l'action totale (the whole agency) qui serait requise pour amener le corps de l'état initial à l'état où il se trouve ».

Nous avons insisté déjà sur la préoccupation si intéressante qu'affiche Thomson, de ne pas exclure la possibilité d'une quantité d'énergie pratiquement indéfinie dans une portion limitée de matière.

### § 3. — L'ÉNERGIE ET LA CAPACITÉ DE PRODUIRE DU TRAVAIL, TENTATIVES DE DISTINCTION.

Mais si la fonction définie par Thomson d'une façon très claire, et par l'expression mathématique qu'il considère, et par la traduction qu'il donne de cette formule en langage ordinaire, satisfait parfaitement à la condition de la conservation; — il faut bien reconnaître que le terme qu'il a choisi d' « énergie mécanique » et les commentaires qu'a provoqués cette dénomination, prêtaient facilement à une fausse interprétation.

Ce que Thomson appelait « énergie mécanique » d'un corps, Clausius l'a nommé simplement « énergie ». Nous l'appelons aujourd'hui de préférence « énergie interne »; et c'est certainement préférable.

En effet, quand Thomson définit l'énergie mécanique totale d'un corps par la valeur numérique de tout « l'effet qu'il pourrait produire en chaleur émise et en résistances vaincues », il ne dit pas du tout qu'on sera maître d'utiliser intégralement cette énergie en résistances vaincues, plutôt qu'en chaleur émise. Il dit simplement que s'il arrive que, dans un cas, on tire du corps plus de travail et moins de chaleur, —

dans un autre, moins de travail et plus de chaleur, — travail et chaleur (évaluée en unités mécaniques) feront, dans les deux cas, une somme constante. Mais ce qu'il risque de laisser entendre au lecteur, c'est que cette *énergie mécanique totale* est susceptible d'être utilisée à volonté sous forme de chaleur ou de travail et, en particulier, d'être intégralement employée à produire du travail mécanique. Et cela est si vrai que Rankine définira plus tard l'énergie : « une capacité quelconque de produire du travail » (capacity of any sort for performing work).

Cette définition pourrait convenir à la puissance motrice de Carnot. Elle ne convient pas à ce que Thomson a appelé « l'énergie mécanique d'un fluide ».

Thomson n'a pas tardé à s'en rendre compte.

Que deux corps matériels soient en présence, isolés du reste du monde; ils peuvent échanger entre eux travail et chaleur; mais la somme de leurs énergies reste constante. L'« énergie mécanique » de ce système, — au sens de Thomson, — se conserve; mais sa capacité d'accomplir du travail ne se conservera pas.

Dans un mémoire sur la *Restauration de l'énergie mécanique d'un corps inégalement chauffé*, le même Thomson s'exprime ainsi :

« Quand de la chaleur s'est diffusée par conduction d'une partie à une autre d'un système inégalement chauffé, le corps est mis dans un état tel qu'il est impossible d'en tirer autant d'*effet mécanique d'espèce non thermique* qu'on en aurait tiré du corps dans son état primitif. Par conséquent, si le corps est donné dans une enveloppe imperméable à la chaleur, avec ses différentes parties à différentes températures, une *dissipation* d'énergie mécanique en lui, se poursuivant jusqu'à ce que les températures soient les mêmes dans toutes ses parties, ne peut être évitée qu'en restaurant immédiatement une portion de son énergie

mécanique à partir de l'état de chaleur, et égalisant la température de toutes ses parties, par l'opération des machines thermodynamiques parfaites. »

A la première phrase, Thomson ajoute une note bien caractéristique. Le mémoire était écrit en 1852. Dans la note, ajoutée le 14 janvier 1853, Thomson déclare qu'au lieu de « effet mécanique d'espèce non thermique », il aurait dit simplement « énergie potentielle », s'il avait eu connaissance, au moment où il rédigeait son mémoire, de cette « admirable » expression, employée depuis par Rankine. On comprend très bien ce que la formule « effet mécanique d'espèce non thermique » peut avoir de choquant. C'est l'affirmation que « l'énergie mécanique » d'un système isolé ne peut produire qu'une dose limitée, sans cesse décroissante, d'effets mécaniques proprement dits. C'est l'affirmation qu'il arrivera un moment où toute « l'énergie mécanique » du système sera passée sous forme thermique, incapable de produire aucun effet d'une autre espèce. C'est la preuve que l'expression « d'énergie mécanique » n'est pas heureuse, et on n'a pas tardé à en effacer, en effet, l'épithète de « mécanique ». Donc, cette « capacité d'accomplir un travail » que l'on cherchait à définir par la périphrase d' « effet mécanique d'espèce non thermique », n'est certainement pas l' « énergie mécanique » de Thomson.

Est-ce du moins « l'énergie potentielle » de Rankine? La note ajoutée par Thomson à son mémoire donnerait à croire qu'il l'a pensé un moment. Là encore, il a dû reconnaître que l'expression nouvelle, — quelque heureuse et « admirable » qu'on la suppose, — ne saurait être employée comme exactement synonyme d'aptitude à produire un effet utile. Presque tout ce que Rankine comprendra dans l'énergie potentielle est bien, à la vérité, de l'énergie libre, apte à produire du travail, mais la réciproque n'est pas vraie. Et d'ailleurs Thomson est surtout préoccupé de

l'énergie mécanique d'espèce non thermique qu'il est possible d'extraire d'un milieu inégalement chauffé, et qui ne rentre certainement pas dans les énergies potentielles de Rankine.

La capacité de produire du *travail* à partir de la chaleur, décidément, ne peut être identifiée ni avec l'*énergie mécanique* telle que Thomson l'a définie, ni avec l'*énergie potentielle* de Rankine; et c'est cette capacité que Thomson cherche à baptiser d'un nom commode, et pour laquelle il proposera plus tard à Tait le vocable nouveau de « motivité thermodynamique », — tant il est vrai qu'avant le moment où l'on s'est décidé à nommer « énergie utilisable » la « capacité de produire du travail », on a successivement essayé d'identifier cette capacité avec « l'énergie » puis avec « l'énergie potentielle », et que la confusion que le public commet encore aujourd'hui a pour excuse de correspondre peut-être à un moment fugitif de la pensée des plus grands savants. Nous allons retrouver ces tâtonnements dans la tentative pour fonder une classification des diverses formes d'énergie sur la notion d'énergie potentielle.

### § 4. — L'« ÉNERGIE POTENTIELLE ».

« Dans tous les cas, dit Tait, où l'énergie est dormante, elle prend le nom d'*énergie potentielle*[1] ».

L'idée de distinguer l'énergie dormante et l'énergie active était excellente, et elle trouve une application légitime en mécanique pure. Dans un système conservatif, il y a constance de la somme de deux termes: *énergie statique* et *énergie dynamique*, avait dit tout d'abord Thomson; — *énergie potentielle* et *énergie actuelle*, a dit ensuite Rankine; — *énergie potentielle* et *énergie cinétique*, ont dit enfin Thomson et Tait,

1. *Esquisse historique*, p. 73.

qui ont fait adopter ce terme d'énergie *cinétique* pour désigner la demi-force vive ou « la quantité de travail qu'une masse peut développer en vertu de son mouvement[1] ».

Mais en créant ces deux expressions symétriques: *énergie potentielle*, *énergie actuelle*, Rankine avait eu de plus hautes ambitions. Il avait prétendu créer une nomenclature qui fût générale, et permît de ranger en deux catégories, et en deux seulement, toutes les *formes diverses de l'énergie*.

Pour Rankine, « l'énergie actuelle ou sensible est une condition mesurable, transmissible et transformable, dont la présence est cause qu'une substance tend à changer son état à un ou plusieurs points de vue. En cas de tels changements, l'énergie actuelle disparaît, et est remplacée par :

« L'énergie potentielle ou latente, qui est mesurée par le produit d'un changement d'état par la résistance contre laquelle est fait ce changement.

« La force vive de la matière en mouvement, la chaleur thermométrique, la chaleur rayonnante, la lumière, l'action chimique et les courants électriques sont des formes d'énergie actuelle. Celles de l'énergie potentielle sont les puissances mécaniques de la gravitation, de l'élasticité, de l'affinité chimique, de l'électricité statique et du magnétisme[2]. »

Rankine donne comme formule de la loi de conservation, que *la somme des énergies potentielle et actuelle de l'univers demeure constante*. Son but est de rechercher la loi suivant laquelle se font les transformations d'énergie entre les formes actuelle et potentielle.

Il n'arrive pas à tirer de sa classification un énoncé général et simple pour la loi de transformation, parce

1. THOMSON et TAIT. *Energy*. Good Works, 1863.

2. RANKINE. *On General Law of the Transformation of Energy*. Philos. Magaz., vol. V, p. 106, 1853.

que cette classification est très arbitraire. Il a, incontestablement, l'intuition de deux grandes catégories de formes d'énergie ; et il sent que les transformations de l'énergie se font toujours dans le sens du passage d'une catégorie à l'autre. Mais, dans la recherche de la catégorie où il faut placer telle ou telle forme d'énergie, il tâtonne visiblement.

Toutes les énergies qu'il classe comme énergies potentielles sont des formes supérieures d'énergie, réserve faite pour l'affinité chimique, qui n'est pas de l'énergie entièrement libre. Mais, par contre, un certain nombre de ses énergies actuelles et, en première ligne, « la force vive de la matière en mouvement » sont des énergies de forme supérieure. Si toutes les formes supérieures de l'énergie pouvaient être classées au nombre des énergies potentielles, et les formes inférieures au nombre des énergies actuelles, la loi de transformation serait très simple à formuler ; on aurait tendance continuelle au passage d'énergie potentielle sous la forme actuelle. Par malheur, il n'en saurait être ainsi, dès que l'on range dans la même catégorie des énergies actuelles à la fois l'énergie cinétique d'une masse matérielle en mouvement, et la chaleur thermométrique. Sa tentative de classification en deux catégories de toutes les formes d'énergie est donc une tentative très intéressante, mais seulement prématurée. Et nous retrouvons son idée fondamentale à la base de tout essai ultérieur tendant à formuler une loi générale de transformation de l'énergie.

Ce n'est pas à l'idée même de formuler cette loi de transformation, ni à l'erreur de point de vue qui l'a frappée de stérilité, que s'adressèrent, au début, les objections : c'est à la notion même et à l'expression d'*énergie potentielle*.

Je ne sais si, à l'époque même de Rankine, on

dénonça, comme on l'a fait depuis, dans le recours à l'énergie potentielle, une tentative de retour aux qualités occultes de la scolastique. Sans insister sur ce procès de tendance, on peut faire remarquer à ceux qui s'étonneraient de cette tournure d'esprit chez un physicien anglais que, si Rankine appartient à l'École de Physique anglaise, il n'est pas, à parler strictement, un Anglais, mais un Écossais : celui qui a, le premier, proposé de remplacer la « théorie mécanique de la chaleur », concrète, et, parlant à l'imagination, par la science abstraite et synthétique de l'Energie, ou « Énergétique », écrivait bien en anglais : mais c'est un compatriote de Thomas Reid et de Dugald Stewart, et non un compatriote de Stuart Mill et d'Herbert Spencer.

On pourrait observer que Tait était, pareillement, un Écossais; et s'il n'était pas ridicule de vouloir tout expliquer par la race, surtout quand il s'agit des travaux de savants dont la personnalité est si marquée, il pourrait être intéressant de rechercher dans l'œuvre de lord Kelvin lui-même comment l'influence de ses origines écossaises s'allie aux caractères qui en font un des représentants les plus typiques de la physique anglaise. D'ailleurs, toute comparaison générale entre les manifestations de l'*esprit anglais* dans la physique d'une part, et d'autre part, dans la législation, la philosophie ou la politique, demanderait à être complétée par une comparaison des caractères qui différencient, dans ces divers domaines d'activité, l'esprit écossais de l'esprit proprement anglais.

Quoi qu'il en soit, dès les premiers écrits de Rankine, il se vit reprocher par sir John Herschel d'avoir, par son expression d'énergie potentielle, réduit à une tautologie le principe de la conservation de l'énergie et « substitué un truisme à un grand fait dynamique ». Rankine répondit que l'on doit, au contraire, toujours

viser à « noter les relations physiques par des mots spécialement adaptés à exprimer les propriétés de ces relations ». — « Dans le cas présent, par exemple, énergie actuelle et énergie potentielle sont définies de manière à vérifier cette proposition : que quand un corps ou un système de corps éprouve un gain dans une forme d'énergie, il en perd sous une autre forme, en d'autres termes, que la somme des énergies actuelle et potentielle est « conservée »; — cela résulte des définitions, de manière à sonner comme un truisme ; — mais quand il est prouvé par l'expérience et l'observation qu'il y a des relations conformes entre les objets réels répondant à la définition, ce qui, autrement, eût été un truisme, devient l'expression d'un fait. Une définition ne peut être vraie ou fausse; car elle n'affirme rien, elle se borne à dire: « tel mot ou telle expression doit être employée en tel sens », mais elle peut être réelle ou fantastique, suivant que la description qu'elle contient correspond, ou non, à des phénomènes réels. Quand, par l'aide de l'expérience et de l'observation, on a trouvé un système de définitions qui possède la réalité, la précision et la qualité d'être complet (*the completeness*), la réduction d'un fait physique à l'apparence d'un truisme est souvent une conséquence inévitable de l'usage du terme ainsi défini ». Rankine conclut que « le fait de donner à une loi physique l'apparence d'un truisme, loin d'être matière à objection, est la preuve que la définition choisie est en étroite harmonie avec la réalité[1] ».

Sans doute, il est exact que la définition n'est pas *vraie* ou *fausse*; elle est « réelle ou fantastique ». Mais le seul fait qu'on a donné un nom à une grandeur « fantastique » peut la faire prendre pour une grandeur réelle. Et ce qui est grave, ce ne serait pas, comme le reprochait Herschel à Rankine, d'avoir

1. *Scientific papers*, p. 229.

donné à une grande loi physique, *vraie*, l'allure d'un truisme, mais *d'avoir donné l'allure d'un truisme à une fausse loi physique.*

M. Henri Poincaré remarquait, dans sa *Thermodynamique*, que, si l'on a admis si longtemps l'indestructibilité du calorique, c'est parce que l'on parlait du « fluide calorique »; on avait beau, dès lors, définir correctement le calorique, on sous-entendait qu'il se conservait. Le terme d'énergie a donné lieu à une confusion aussi grave et qui dure encore : or, il n'est pas douteux que, plus que personne, par l'addition des deux épithètes symétriques : actuelle et potentielle, Rankine a travaillé à le populariser.

La confusion, nous sommes maintenant en mesure de préciser en quoi elle consiste. Lord Kelvin avait, à coup sûr, le droit de définir comme il l'a fait « l'énergie mécanique » ou, simplement, « l'énergie » d'un corps matériel; et *sa définition est devenue la définition admise par l'unanimité des physiciens.* Mais déjà, par ce mot *énergie* on sous-entendait autre chose : Rankine lui-même en témoigne de la façon la plus formelle, puisque, dans la phrase où il croit pouvoir affirmer que le mot n'ayant jamais été employé dans des écrits scientifiques, « tout danger d'ambiguïté est écarté », il donne au mot énergie le sens de « capacité de produire du travail. »

Ce qu'on peut reprocher au créateur de l'Énergétique, quand il a, par son terme d'énergie potentielle, si fortement contribué à concrétiser une idée scientifique, ce n'est donc pas d'avoir donné l'apparence d'un truisme à la grande loi de la conservation de l'énergie; c'est, au contraire, d'avoir donné l'apparence d'un truisme à la fausse loi de la conservation de la « capacity for performing work ».

Les mauvais exemples sont contagieux. Harcelés par des interlocuteurs qui exigeaient en très peu de

mots une définition de l'*énergie*, combien d'auteurs, depuis Rankine, ont répété que l' « énergie » d'un système, c'est le travail qu'on en peut extraire, c'est sa « capacité de produire du travail? » La définition a l'avantage d'être courte, claire, conforme à l'étymologie : elle a l'inconvénient d'être fausse.

La définition est juste s'il s'agit de l'*énergie utilisable* ou de la *puissance motrice;* mais l'*énergie* n'est pas l'énergie utilisable ou la puissance motrice. M. Gouy[1], dans son mémoire *sur l'énergie utilisable*, M. Le Chatelier[2], dans son mémoire *sur l'énergétique*, le rappellent expressément, et dénoncent, une fois de plus, la confusion trop courante. Une définition correcte de ce qu'est réellement l'*énergie* est nécessairement un peu longue et compliquée : c'est la définition de lord Kelvin (v. p. 249). *Il n'y en a pas d'autres*. Il faut à tout prix faire intervenir la notion de chaleur dans la définition de l'énergie, sous peine de sacrifier la vérité à une fausse simplicité.

Dans un système matériel isolé, l'énergie se conserve, la capacité de produire du travail ne se conserve pas. En certains cas particuliers, énergie et capacité de travail se confondent; mais ce sont, en général, des grandeurs fort différentes. Employer l'une pour l'autre ces deux expressions est, en général, une faute d'autant plus grave, qu'il y faut chercher la raison capitale de la lente diffusion de la loi qui régit les transformations de l'énergie. Pour des personnes habituées à ne pas mettre en doute la conservation de la capacité de produire du travail, le sens dans lequel se font les échanges d'énergie n'a pas d'intérêt. Sur cette lenteur de la diffusion du second principe, nous aurons occasion d'entendre, un peu plus tard, les doléances de Rankine lui-même.

1. *Journal de Phys.*, 2e série, t. VIII, p. 501-518, 1889.
2. *Journal de Phys.*, 3e série, t. III, p. 291, 1894.

# QUATRIEME PARTIE

## DÉGRADATION ET MÉCANISME

---

## CHAPITRE XVIII

### La crise du mécanisme. — I. Le retour à la physique cartésienne.

---

#### § 1. — LE PROBLÈME DU MÉCANISME ET LA THERMODYNAMIQUE.

« La question la plus importante peut-être de la philosophie scientifique actuelle est celle de la compatibilité ou de l'incompatibilité de la Thermodynamique et du mécanisme. Le mécanisme, soit sous la forme que lui a donnée Descartes, la forme purement cinétique, à laquelle on paraît revenir de nos jours, soit sous la forme du dynamisme de Newton sur lequel ont vécu tous les grands physiciens-mathématiciens français du commencement du XIXe siècle, a été contesté de notre temps au nom de la Thermodynamique. Il paraît, en effet, très bien s'accorder avec l'idée de la conservation de l'énergie, mais non avec le second principe auquel les Anglais ont donné le nom de « dégradation de l'énergie ».

« Il y a, en effet, dans le monde, quelque chose qui se conserve, mais aussi quelque chose qui s'use. Rien ne se crée, mais quelque chose se perd. Si on arrivait à concilier cette idée avec la conception d'un mode purement mécanique, on ne verrait pas, en tout cas, triompher le mécanisme auquel nous ont habitué certains vulgarisateurs et qui exclut l'idée de dégradation et d'usure du monde [1]. »

C'est en ces termes qu'au Congrès de physique de 1900, je soulignai l'importance du problème posé par une communication de M. Lippmann. Dans des articles antérieurs de quelques années, j'avais, l'un des premiers, appelé l'attention des philosophes sur ces questions, et signalé parmi les physiciens une double tendance : tandis que les uns semblaient avoir à cœur de restaurer la pure physique cartésienne, d'autres affirmaient, sur un ton plus ou moins tranchant, la faillite du mécanisme ou, comme disait Ostwald, la « banqueroute du matérialisme scientifique. » Sans attendre même que le mouvement d'idées qui a suivi la découverte de Roentgen fût venu montrer la fécondité persistante de l'atomisme, je m'étais refusé à souscrire à la condamnation définitive de tout mécanisme, et je m'étais appliqué à séparer la cause du mécanisme physique de celle du mécanisme littéraire exclusif de l'idée de dégradation de l'énergie.

Ces questions de philosophie scientifique sont plus en honneur aujourd'hui qu'il y a douze ans ; dans ces derniers temps, elles ont donné lieu à quelques travaux de premier ordre [2]. A mon sens, l'on n'a pas encore assez médité et examiné sous toutes ses faces le problème précis de la réduction d'un monde mar-

1. Travaux du Congrès international de Physique réuni à Paris en 1900, t. IV, p. 29.

2. Il faut citer, parmi les travaux qui n'émanent pas de physiciens de profession, mais de philosophes, les ouvrages de M. Abel Rey.

chant dans un sens à des phénomènes séparément symétriques par rapport à l'avenir et au passé.

Nous nous proposons ici de montrer d'abord en quoi la physique de la fin du XIXe siècle revenait au cartésianisme, et quelle opposition, dans le même temps, s'élevait contre le principe de toute doctrine mécaniste ou atomistique. Nous verrons ensuite en quoi les découvertes relatives à l'ionisation des gaz ont définitivement transformé en vérité scientifique un des postulats essentiels de l'atomisme, tout en posant le problème du mécanisme sur un terrain nouveau. Nous indiquerons enfin en quoi consiste le conflit entre le mécanisme et le principe de la dégradation de l'énergie.

### § 2. — EXEMPLES DE PHYSICIENS MÉCANISTES : CAUCHY.

Un des maîtres regrettés de la physique mathématique en France, M. Sarrau, m'a conté sur Cauchy une anecdote caractéristique, qu'il tenait du P. Gratry, Cauchy se promenait avec le P. Gratry dans les jardins du Luxembourg. Ils s'entretenaient de la vie future, du bonheur qu'auraient les élus à connaître enfin, sans restriction et sans voile, des vérités longtemps et péniblement poursuivies dans ce monde. Faisant allusion aux recherches de Cauchy sur la théorie mécanique de la réflexion de la lumière, Gratry émit l'idée qu'une des grandes joies intellectuelles de l'illustre géomètre dans l'autre vie serait sans doute de pénétrer le secret de la nature de la lumière, et de savoir le dernier mot de ces problèmes d'optique, objet de ses méditations. Cauchy se récria : sur ce point, il ne lui paraissait pas admissible qu'on pût apprendre jamais quelque chose de plus que ce qu'il savait ; il ne concevait pas que l'intelligence la plus parfaite pût comprendre le mécanisme de la

réflexion autrement qu'il ne l'avait exposé. Il avait donné du phénomène une *théorie mécanique :* sa piété n'allait pas jusqu'à croire qu'à Dieu lui-même il fût possible de faire autre chose et de faire mieux.

Ce trait a le mérite de peindre fidèlement un état d'esprit qui était commun à la plupart des physiciens de la première moitié du siècle. Le but final, le but unique de la physique était, pour eux, de donner de tous les phénomènes naturels une explication mécanique. Quand il avait construit une explication mécanique, et alors seulement, l'esprit avait pleine et entière satisfaction. On acceptait comme un axiome universellement admis le postulat audacieux de Descartes que, derrière la diversité des formes et la variété des apparences, il n'y a que *matière, figure* et *mouvement* ; sous le voile de la réalité physique, le rôle du chercheur est de déceler les ressorts mécaniques qui en sont l'âme : ressorts trop délicats pour être aperçus de nos sens, mais rendus chaque jour, par le progrès continu de la science, plus saisissables par notre esprit.

Sans être disposés peut-être à donner à leur pensée la forme un peu spéciale que donnait Cauchy à la sienne, un bon nombre de savants de notre époque sont restés, sur le but et la portée de la physique, en accord complet avec les savants du début et du milieu du siècle ; mais on ne rencontrerait pas aujourd'hui, dans le monde savant, la même unanimité. La conception du mécanisme universel a été battue en brèche. On a soutenu que certaines des idées qui dominent la physique contemporaine sont radicalement incompatibles avec le mécanisme. Et néanmoins on a vu, vers la fin du XIX[e] siècle, des physiciens éminents se ranger à des idées, plus voisines encore de la pure physique cartésienne que n'étaient celles des contemporains d'Ampère et de Cauchy.

C'est cette première phase de la *crise du mécanisme* qu'il convient de raconter tout d'abord.

### § 3. — LA PHYSIQUE THÉORIQUE DE DESCARTES.

Quand nous parlons ici de la physique de Descartes, il s'agit de sa métaphysique de la nature. Il ne s'agit, ni de relever ses erreurs nombreuses et parfois grossières, ni de lui attribuer, d'après quelques membres de phrases choisis avec soin, la divination ou l'intuition de tout ce qui s'est fait après lui. Ce qu'il importe, c'est de voir quelle conception il avait de la physique, en quoi il a réellement donné une orientation nouvelle aux recherches de physique théorique, et dans quelle mesure la physique théorique d'aujourd'hui a conservé cette orientation.

C'est en effet en physique théorique, et là seulement, que Descartes est novateur. A la même époque, un peu antérieur à lui, vivait Galilée, qui, le premier peut-être, eut avec une netteté parfaite le sens de la science expérimentale. Non, certes, que Galilée dédaignât le raisonnement et le calcul : il ne s'est pas fait faute d'entremêler ses *Dialogues* de considérations métaphysiques et théologiques ; mais le raisonnement reste pour lui, semble-t-il, un auxiliaire ; c'est l'instrument de coordination qui permet de ramener les phénomènes naturels à des combinaisons de phénomènes plus simples, susceptibles d'être reproduits artificiellement : la nécessité de répondre aux objections sérieuses contre la rotation de la terre le conduit à l'étude du mouvement relatif, et la théorie du mouvement relatif lui permet de deviner les lois de la chute des corps ; l'artifice du plan incliné, en modifiant la force qui fait tomber le corps pesant sans modifier les lois de la chute, assure un contrôle rigoureux de l'exactitude de ces lois : c'est proprement

ici l'*expérimentation*, au sens moderne du mot. Elle est au couronnement de l'édifice qu'a construit Galilée, comme l'observation était à la base.

Pascal, autre contemporain, un peu postérieur à Descartes, a compris aussi, au point de paraître l'exagérer, le rôle capital de l'expérience. « Les expériences qui nous donnent l'intelligence de la nature, dit-il dans la préface du *Traité du vide*, multiplient continuellement ; et *comme elles sont les seuls principes de la physique*, les conséquences multiplient à proportion. » On pourrait prendre cette phrase pour celle d'un pur empiriste, si elle n'était sous la plume du théoricien de génie qui sut préciser, pour en extraire tout son contenu, une notion vulgaire comme celle de corps fluide à molécules parfaitement mobiles, et bâtir ainsi toute l'hydrostatique sur le « principe de Pascal ». Ni Galilée, ni Pascal, n'eussent refusé sans doute de souscrire à la déclaration de principes que Fourier a mise en tête du *Discours préliminaire* de sa *Théorie de la chaleur* : « Les causes primordiales ne nous sont point connues ; mais elles sont assujetties à des lois simples et constantes que l'on peut découvrir par l'observation, et dont l'étude est l'objet de la philosophie naturelle. »

Descartes est plus ambitieux. Il fait précisément consister la philosophie naturelle à découvrir, non seulement les lois simples et constantes, mais avant tout les *causes primordiales*. A l'innombrable variété de phénomènes que la physique nous présente, il se refuse à concevoir d'autre cause primordiale que le mouvement, — mouvement de la matière ordinaire dans les corps pondérables, — mouvement d'une matière « plus subtile et plus pénétrante » dans les interstices des corps et dans les espaces interplanétaires, car il ne saurait y avoir de vide dans la nature. Pour établir ces vérités essentielles, pas n'est besoin de faire appel à l'expérience. De même qu'en

géométrie, de même qu'en métaphysique, le seul besoin de simplifier les notions jusqu'à y voir clair, et l'habitude de l'analyse, permettent à l'esprit de tirer la vérité de son propre fonds. L'expérience n'intervient même pas à titre de contrôle indispensable des conséquences « déduites des premiers principes de la nature ».

« Et toutes ces choses suivent si clairement des principes qui ont esté cy-dessus exposez, que je ne laisserais pas de juger qu'elles sont telles que je viens de dire, encore que je n'aurais aucun égard aux propriétés qui en peuvent être déduites : mais j'espère faire voir que toutes celles de ces propriétés que les plus curieuses expériences des admirateurs de l'aymant ont pu découvrir jusques à présent, peuvent si facilement estre expliquées par leur moyen, que cela seul suffirait pour persuader qu'elles sont vrayes, encore qu'elles n'auraient point été déduites des premiers principes de la nature [1]. »

Quant à ces principes, dont la recherche constitue « ce qui se nomme proprement philosopher », ils doivent avoir deux conditions :

« L'une, qu'ils soient *si clairs et si évidents que l'esprit humain ne puisse douter de leur vérité lorsqu'il s'applique avec attention à les considérer* ; l'autre, que ce soit d'eux que dépende la connaissance des autres choses, en sorte *qu'ils puissent être connus sans elles, mais non pas réciproquement elles sans eux* [2]. »

Ce n'est donc pas sur une base expérimentale que Descartes établira le mécanisme universel. C'est sur l'impossibilité pour un esprit clair de comprendre le monde autrement. C'est sur l'absurdité des explica-

1. *Principes*, IV, § 145.
2. Préface des *Principes*.

tions de l'Ecole, fondées sur les « qualités occultes » et les « formes substantielles » :

« Que si vous trouvez étrange que, pour expliquer ces éléments, je ne me serve point des qualitez qu'on nomme Chaleur, Froideur, Humidité, Sécheresse, ainsi que font les philosophes : je vous diray que les qualitez me semblent avoir elles-mêmes besoin d'explication, et que, si je ne me trompe, tant ces quatre que toutes les autres, et même les *formes* des corps inanimez peuvent être expliquées, sans qu'il soit besoin de supposer pour cet effet autre chose en leur matière que le mouvement, la grosseur, la figure et l'arrangement de ses parties[1]. »

La critique de Descartes a si bien porté, que c'est devenu un lieu commun de plaisanter les qualités occultes et les formes substantielles. Peut-être serait-il assez amusant de rechercher si quelques-uns de ceux qui traitent avec le plus grand dédain la science antécartésienne ne sont pas les premiers à faire intervenir parfois des propriétés qui ressemblent, à s'y méprendre, aux « qualités occultes ». Qui oserait affirmer qu'il n'y a pas, dans le langage de certains représentants de la médecine actuelle, des « explications » qui rappellent de très près la « vertu dormitive » de l'opium ?... Aussi bien, le mal n'est pas d'employer un mot précis, fût-il nouveau et fût-il barbare, pour désigner une « qualité » qu'on a reconnue à un phénomène ; le mal n'est pas davantage de choisir ou de créer ce mot sans attendre d'avoir trouvé une explication à cette qualité, c'est-à-dire de l'avoir réduite à une autre. Le mal serait de s'imaginer qu'un mot est, à lui seul, une explication, et de se trouver avoir épuisé les ressources de son esprit après avoir fabriqué un mot. Ce fut le travers des

1. *Monde*, ch. V.

décadents de la scolastique. Et, à cet égard, l'initiative de Descartes, venant proclamer l'unité de cause et l'unité d'explication derrière la diversité des mots, fut une initiative heureuse et féconde : elle secoua les esprits, elle les força à réfléchir et à chercher. Et ce par quoi elle a agi, ce qui a été en physique un principe de progrès, c'est moins encore peut-être la forme du mécanisme, variable avec les époques, évoluant entre le cinétisme pur et le dynamisme, que ce qui est, selon nous, l'âme même du cartésianisme : le besoin de réduction à l'unité, et le parti pris de ramener les *qualités secondes* à des *qualités premières*.

### § 4. — EXEMPLE DE RÉDUCTION D'UN PHÉNOMÈNE AU MOUVEMENT : LE SON.

Quelles sont les parties de la physique qui se prêtent le mieux à l'explication mécaniste ? Y en a-t-il qui paraissent y être rebelles ?

Dans une réponse à Ostwald et aux partisans de « la nouvelle énergétique », Boltzmann observait justement que, si l'on tient à mettre en évidence les phénomènes qui résistent à l'interprétation mécaniste, il ne convient pas de laisser dans l'ombre ceux dont elle est venue rendre compte avec une merveilleuse clarté. L'*acoustique* nous offre, à cet égard, un modèle incomparable de science bien *faite*, et la théorie du son est le triomphe de la physique cartésienne. Les diverses sensations sonores diffèrent entre elles par des *qualités* caractéristiques : la *hauteur* — de deux sons, l'un est plus aigu ou plus grave que l'autre, ou bien tous deux sont à l'unisson ; — l'*intensité* — un son peut être plus faible, un autre plus fort ; — le *timbre*, qualité plus délicate à définir, et qui nous fait discerner deux instruments qui rendent la même note.

Pour un cartésien, ces trois qualités : hauteur, intensité, timbre, sont des *qualités secondes*. Elles doivent, de toute nécessité, se réduire à des *qualités premières*, c'est-à-dire à des qualités géométriques et cinématiques de la matière.

Chacun sait quelle a été la réponse de l'expérience : la cause objective de la sensation sonore est un mouvement périodique, un mouvement vibratoire d'un corps élastique. Nous pouvons en montrer la réalité, le faire toucher du doigt, encore que ce mouvement échappe à nos yeux ; il suffit de forcer le corps vibrant à inscrire lui-même ses vibrations. Fixons à une branche d'un diapason un petit stylet, et attaquons le diapason avec l'archet : la pointe exécute un mouvement de va-et-vient trop rapide pour qu'on puisse la suivre des yeux, et voir autre chose qu'une petite ligne horizontale continue. Si l'on promène, devant la pointe, une plaque de verre noircie au noir de fumée, ou qu'on dispose devant elle un cylindre tournant recouvert d'une feuille de papier noircie, la pointe vibrante dessinera une ligne sinueuse. L'étude de ce tracé sinueux pourra se faire ensuite tout à loisir ; elle renseignera sur les moindres particularités du mouvement vibratoire qui est inscrit sur le tracé. A côté l'un de l'autre, on peut inscrire les sons de deux instruments, et les comparer. Deux sons de même hauteur, deux sons que l'oreille déclare être à l'unisson, donneront sur une même longueur de la feuille noircie exactement autant de sinuosités. Ils ont le même nombre de vibrations dans une seconde. La hauteur tient uniquement à la *rapidité* de la vibration. — A quoi répond l'intensité ? Le même diapason, plus vigoureusement attaqué, donne la même note, mais cette note s'entend mieux et de plus loin. Le graphique nous montre que les sinuosités ont plus d'*amplitude* ; l'excursion de la pointe mobile à droite et à gauche de sa position d'équilibre est plus étendue.

L'intensité tient à l'*amplitude* de la vibration. — Inscrivons, côte à côte, le *la* d'un diapason et le *la* d'une corde de piano. Voilà deux notes de même hauteur, que pourtant l'oreille la moins exercée ne confondra pas. Aussi bien, les deux tracés sont différents. Tous les deux sont sinueux, et il y a autant de sinuosités dans l'un et dans l'autre; mais la courbe dessinée qui, pour chaque tracé, se reproduit identique à elle-même à chaque vibration nouvelle, n'a pas la même *forme* dans l'un et l'autre tracé. Le *timbre* tient à la *forme* de la vibration.

Qu'il y ait encore matière, en acoustique, à des études de détail importantes et délicates, c'est ce qui n'est pas douteux. Mais on peut dire que l'acoustique est, dans son ensemble, achevée, — du moins la partie purement physique de l'acoustique. Le physicien n'a pas à rendre compte du mécanisme et de la nature de la sensation ; son rôle se borne à voir à quoi répondent, dans le monde extérieur qui agit sur lui, les qualités que lui révèle la sensation. Pour le son, ce travail est fait.

Ce n'est pas à dire qu'une acoustique faite uniquement de géométrie et de mécanique pût être correcte d'un bout à l'autre : pour avoir négligé les phénomènes calorifiques qui accompagnent dans l'air la transmission progressive des ondes sonores, Newton arrivait à une formule inexacte pour la vitesse de propagation de son. Il n'en reste pas moins établi que les qualités du son sont intégralement réductibles à des qualités premières de la matière, au sens cartésien.

## § 5. — L'EXPLICATION MÉCANIQUE DE LA LUMIÈRE ET L'EXPLICATION ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE.

Entre le son et la lumière, les analogies sont nombreuses. La plus saillante est le caractère périodique

des deux phénomènes. Chaque couleur est une note, et la couleur est, pour la lumière, ce qu'est la hauteur pour le son : entre deux couleurs simples, nulle différence qualitative, mais la simple différence d'un phénomène plus rapide à un moins rapide, d'une note aiguë à une note grave. Les notes lumineuses ont des nombres de vibrations qui se chiffrent en centaines de trillions par seconde.

Comme le son, la lumière met un certain temps pour se propager. Elle va, il est vrai, beaucoup plus vite, mais elle ne se propage pas non plus instantanément. L'une des différences capitales entre la lumière et le son est que la lumière n'exige pas, pour se transmettre de la source lumineuse jusqu'à notre œil, une continuité ininterrompue de milieux matériels. Elle traverse le vide. Si l'on veut encore rendre compte des sensations lumineuses à l'aide de la matière et du mouvement, le choix reste entre deux hypothèses : imaginer qu'à travers ce vide que franchit la lumière il y a *émission* d'une matière envoyée par le corps lumineux et qui vient frapper notre œil ; ou bien déclarer que notre « vide » n'est vide qu'en apparence et qu'il est rempli d'un *milieu* élastique, susceptible de propager de proche en proche l'ébranlement lumineux, comme l'air propage un ébranlement sonore. M. H. Poincaré disait, en 1895, que nous assistions à une reprise de la lutte célèbre qui agita le XVIII^e siècle et la première moitié du XIX^e, entre partisans du système de l'*émission* et partisans du système des *ondulations* : le terrain de la lutte, toutefois, s'était déplacé. On ne se battait plus autour des rayons lumineux ; on se battait autour des *rayons cathodiques* produits dans les tubes à gaz raréfiés : les physiciens anglais soutenaient que ces rayons consistent en un transport de matière ; quelques physiciens allemands, qu'ils ont pour siège, eux aussi, des ondulations de l'éther. Seulement, en ce qui concerne

les *rayons cathodiques*, l'expérience décisive de Jean Perrin a assuré la victoire à l'*émission* et aux Anglais. Le triomphe est même plus complet qu'il n'est apparu tout d'abord : l'idée de *corpuscules* émanés du soleil et venus jusqu'à nous, loin de scandaliser les physiciens d'aujourd'hui, paraît nécessaire pour rendre compte de certains faits de magnétisme terrestre et d'électricité atmosphérique.

Observons d'ailleurs qu'il y a confusion manifeste à représenter la théorie de l'émission comme étant, dans ses grandes lignes et dans son principe, opposée à la physique cartésienne. Elle suppose, dira-t-on, la réalité du *vide*, que niait Descartes. Il faut plutôt dire qu'elle n'a besoin de rien mettre et de rien imaginer dans le vide ; ce n'est pas la même chose tout à fait que d'adopter expressément l'hypothèse d'un vide absolu. Et le système de l'émission, en définitive, prétend aussi tout expliquer par « matière, figure et mouvement ». Si la première idée nette de la théorie des ondes lumineuses est due à Huygens, qui est un cartésien, n'oublions pas qu'une des affirmations les plus chères à Descartes a été la propagation instantanée de la lumière à toute distance.

Sur la nature et les propriétés de la lumière, nous sommes aujourd'hui en possession d'une admirable théorie, créée presque de toutes pièces par le génie de Fresnel.

Il ne faut pourtant pas imaginer que le mécanisme de la production de la lumière nous soit encore aussi bien connu que celui de la production du son. La lumière a pour siège ce *milieu* dont nous sommes bien conduits à admettre l'existence et qu'on appelle l'*éther;* le son a pour siège la matière ; et si nous ne connaissons pas très bien la matière, nous connaissons encore moins l'éther. C'est ce qui explique que, s'il n'existe qu'une théorie du son, admise par tous sans contestation, il existe plusieurs théories de la lumière ; et je ne

parle pas des théories laissées de côté, comme celle de l'émission : je parle des théories qui admettent toutes la propagation par ondes et l'existence de l'éther. Il n'y a pas, au moins jusqu'à présent, une façon unique de se figurer la constitution de cet éther : peut-être sommes-nous en voie de le pénétrer mieux qu'on ne l'avait fait jusqu'ici ; peut-être, ainsi que l'écrivait M. Brillouin quelques semaines avant la découverte de Rœntgen, « sommes-nous à la veille d'*avoir prise* sur l'éther, comme on a commencé à avoir prise sur les gaz, à partir d'Otto de Guéricke ». Mais enfin, la façon de concevoir la nature de l'éther lumineux est encore loin d'être nette, et, dans cette façon de la concevoir, il reste toujours une large part à l'arbitraire.

Il y a une quarantaine d'années, le physicien anglais Clerk Maxwell jetait les bases d'une autre théorie de la lumière, qui s'est développée depuis, non pas, comme quelques-uns l'ont pu croire, en opposition avec la théorie élastique des ondulations, mais parallèlement à cette théorie. C'est la *théorie électromagnétique* de la lumière. Elle a trouvé une base expérimentale dans la grande découverte de Henrich Hertz. qui réussit à produire des oscillations électriques extrêmement rapides, — moins rapides à coup sûr que les oscillations lumineuses, — mais atteignant presque le chiffre de un milliard par seconde. Hertz réussit surtout à mettre en évidence la propagation à travers l'espace de l'action exercée par ces oscillations électriques ; l'expérience lui démontra un résultat capital, qu'avait deviné Maxwell : la vitesse de propagation de ces ondes électriques est égale à 300.000 kilomètres par seconde, c'est-à-dire à la vitesse de la lumière. Les « rayons de force électrique » se propagent dans les mêmes milieux, et suivant les mêmes lois que les rayons lumineux eux-mêmes ; comme eux, ils se réfléchissent, se réfractent, se diffractent, se

polarisent. S'ils n'impressionnent pas la rétine humaine, ils peuvent agir sur des récepteurs appropriés, comme le radioconducteur de Branly, et permettre ainsi la télégraphie sans fil.

Seule, la *hauteur* des rayons de force électrique réalisés par Hertz et par ses successeurs est encore différente de la hauteur des rayons lumineux visibles; il reste entre les rayons « hertziens », de courte période, et les rayons infra-rouges extrêmes, donnés par une source de lumière, les rayons « restants » de Rubens, quelques octaves encore vides ; mais l'intervalle se resserre tous les jours, et il n'est pas téméraire d'espérer qu'on finira par le combler. Les radiations lumineuses ne seraient dès lors qu'un cas spécial des radiations hertziennes. La cause de la lumière serait un phénomène électrique, un phénomène électrique particulier ayant comme caractère essentiel d'être périodique, et à période très brève, le nombre de ces périodes se chiffrant en centaines de trillions par seconde.

Si l'on admet d'une façon définitive, comme on commence à le faire aujourd'hui, que la lumière a pour cause un phénomène électrique, sera-ce la condamnation de toute théorie mécanique de la lumière? Gardons-nous de le croire. Pour un cartésien, il restera seulement à trouver à son tour une théorie mécanique à l'électricité; mais quel que dût être le succès de cette tentative ultérieure, il y aurait déjà simplification de la physique et progrès vers l'unité, si l'on avait réduit l'optique à devenir un chapitre de l'électricité. Ce qu'il faut retenir de cet exposé, ce n'est donc pas qu'il y ait conflit entre deux groupes de théories de la lumière, inconciliables entre elles : théories mécaniques et théories électriques; c'est seulement qu'on peut considérer la question à deux points de vue différents. D'une part, l'explication mécanique, je devrais dire les explications mécaniques,

car il en est d'innombrables, restent intactes devant la théorie électromagnétique ; mais, d'autre part, il existe de bons esprits prêts à se déclarer tout aussi satisfaits d'une *explication* qui ne serait pas directement une explication mécaniste.

### § 6. — LA THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

Peu de temps après la théorie des ondes lumineuses, et par un de ces exemples d'influence réciproque fréquents dans l'histoire de la science, se constitua « la théorie mécanique de la chaleur ». *La chaleur mode du mouvement*, *la théorie mécanique de la chaleur*, tels sont les titres des ouvrages que Clausius, Tyndall, Hirn, et tant d'autres, ont consacrés à la science nouvelle. Les livres qui traitent aujourd'hui de la théorie de la chaleur portent le titre plus modeste de *Thermodynamique*. Dans ce changement de façade, il faut voir un changement de méthode plus encore qu'un changement d'idées. Tout le monde est d'accord, maintenant, pour apprécier l'avantage d'une exposition qui ne soit pas fondée sur des hypothèses; mais tous ceux qui s'occupent de thermodynamique n'ont pas renoncé à l'idée de chercher une explication mécanique de la chaleur. Pendant quelques années, on regarda comme faisant partie intégrante de la thermodynamique la *théorie cinétique des gaz*. Cette théorie assimile les molécules gazeuses à des balles élastiques en mouvement continuel, s'entrechoquant sans cesse, et donnant, par leurs chocs contre les parois, l'effet d'une pression uniforme ; c'est la vitesse moyenne de ces mouvements moléculaires qui augmente quand on échauffe le gaz, et c'est dans l'accroissement de cette vitesse que consiste l'élévation de température. Après une période de vogue, la théorie perdit beaucoup de son importance, et fut

même en général laissée de côté dans l'enseignement. Mais elle a trouvé un regain de popularité et des raisons nouvelles de s'imposer à l'attention des chercheurs, dans les idées nouvelles qui ont si prodigieusement agrandi depuis quelques années le domaine de la physique.

La Thermodynamique actuelle repose, non plus sur l'hypothèse que la chaleur est un mode de mouvement, mais sur les deux principes fondamentaux qui sont une généralisation de l'expérience, et dont les conséquences, obtenues ensuite par voie déductive, permettent de relier entre eux, par un lien de nécessité logique, des phénomènes jusque-là épars. Le premier de ces principes, énoncé vers 1835 à la fois par Robert Mayer, par Joule et Colding, est le *principe de l'équivalence de la chaleur et du travail*, auquel on n'a pas tardé à donner plus d'extension et dont on a fait le *principe de la conservation de l'énergie*. Incontestablement ce premier principe a été découvert sous l'influence des conceptions mécanistes; si la chaleur est un *mode de mouvement*, le principe n'est que la généralisation d'un théorème de mécanique pure. « La nature, disait Descartes, n'a point fait de lois pour les corps que nous voyons, auxquelles ceux que nous ne voyons pas ne soient assujettis, et les règles que la Méchanique sçait estre si certaines pour les uns sont infaillibles pour les autres [1]. »

Descartes, il est vrai, tout en pressentant que dans un système matériel isolé, il y a, suivant l'expression de M. Poincaré, « quelque chose qui se conserve », s'est d'ailleurs trompé sur ce *quelque chose*. Il croyait à la *conservation* de la *quantité de mouvement*, là où Leibnitz a vu plus tard, et avec raison, la conservation de la *force vive*.

1. *Discours du mouvement local.*

Il est superflu d'insister davantage sur un sujet qui a été le thème de développements innombrables, et sur une idée qui a profondément pénétré dans l'esprit public. On n'en saurait dire autant du second principe. Ce principe nous apprend, nous l'avons déjà dit, que si des transformations inverses d'une espèce d'énergie en une autre espèce sont possibles, toutes ces transformations ne sont pas également aisées : on peut transformer autant qu'on veut du travail mécanique en chaleur; le problème inverse est beaucoup plus difficile, et n'est jamais intégralement résolu. La chaleur est une énergie équivalente en *quantité* à une dose correspondante d'énergie mécanique, mais inférieure en *qualité*.

C'est précisément sur cette différence de qualité qu'est fondée l'objection la plus grave contre la conception du mécanisme universel.

Avant d'aborder cette objection et d'entrer dans quelques détails sur la portée du principe de Carnot, il me reste à signaler un point important sur lequel la physique actuelle s'est rapprochée de Descartes, si l'on compare surtout nos idées d'aujourd'hui aux idées de Newton et des disciples de Newton. Il s'agit de l'attraction universelle et de la notion d'actions à distance.

### § 7. — LES EXPLICATIONS CINÉTIQUES DE L'ATTRACTION A DISTANCE.

Newton fit une des plus grandes découvertes qui aient marqué l'histoire de l'esprit humain, quand il montra qu'on pouvait rendre compte des lois de Kepler relatives aux mouvements des planètes, en admettant qu'il s'exerce entre deux corps célestes quelconques une force attractive de même espèce que la force qui entraîne vers la terre les corps pesants ; c'est la même force qui fait tomber la pomme

sur le sol, et qui retient la lune dans l'orbite qu'elle décrit autour de la terre. C'est la *gravitation universelle*, qui agit en raison inverse du carré des distances et en raison directe des masses. Newton avait la préoccupation de ne pas faire d'hypothèses : *hypotheses non fingo*, écrivait-il en tête du livre des *Principes*. Sur la nature de la force attractive exercée entre deux éléments de la matière, il n'a pas cherché à faire des suppositions compliquées et arbitraires; il s'est borné à remarquer que cet énoncé si admirablement simple d'une loi générale suffit à donner la clé de toutes les lois des mouvements des planètes ; on peut affirmer sans témérité que cette partie de son œuvre est immortelle.

Newton s'est défendu soigneusement de croire à l'existence d'une force attractive réelle, s'exerçant à distance entre une matière et une autre, sans transmission par un milieu intermédiaire :

« Que la gravité soit innée, inhérente et essentielle à la matière, de sorte qu'un corps puisse agir sur un autre corps à distance, à travers le vide, sans aucun intermédiaire qui transmette cette action ou cette force de l'un à l'autre, c'est pour moi une absurdité si grande qu'il me semble impossible qu'un homme capable de traiter de matières philosophiques puisse y tomber [1] ».

Quelques-uns des disciples de Newton manifestèrent une opinion différente, peut-être avec l'idée qu'ils exprimaient la véritable pensée du maître. Estimant à juste titre que l'attraction universelle était une première explication, merveilleusement cohérente, des lois des planètes, ils en vinrent à ne pas se poser même la question de savoir si cette attraction n'avait

1. Cité par FAYE, *De l'Origine du monde*, p. 115.



pas à son tour besoin d'être expliquée ; ils déclarèrent hardiment la *gravité*, propriété inhérente à la matière, tout aussi justement et au même titre que l'impénétrabilité et l'inertie, — les seules qualités premières, avec l'étendue, que Descartes lui eût accordées.

L'œuvre de Newton exerça sur les contemporains une fascination irrésistible. La fin du XVIIIe siècle et le commencement du XIXe siècle sont marqués par la découverte de lois physiques d'attraction et de répulsion (électrique, magnétique) identiques à la loi newtonienne, et par la naissance de théories, comme celles de la capillarité et de l'élasticité, qui ramènent les forces observées à des attractions ou répulsions s'exerçant entre les particules matérielles des corps, et dépendant uniquement des masses des deux particules et de leur distance. Toute cette « physique newtonienne », à laquelle se rattache la constitution en corps de doctrine, de l'électrostatique, du magnétisme, de la capillarité et de l'élasticité, diffère de la physique cartésienne, justement par l'introduction de cette force attractive ou répulsive entre des corps à distance ; et si on ne cherche pas à réduire cette force elle-même à d'autres qualités premières, elle rentre, à n'en pas douter, dans la catégorie de ce qu'un cartésien intransigeant appelle les « qualités occultes ». Toute cette physique rentrera, — au contraire, — dans la physique cartésienne si l'on arrive à justifier les forces attractives et répulsives par des communications de mouvements transmis par l'intermédiaire d'un milieu. En attendant, deux conclusions s'imposent : d'une part, les *newtoniens* se sont opposés aux *cartésiens*, à la façon dont un hérétique s'oppose au groupe religieux dont il constitue une variété. Les newtoniens admettant comme primordiale la notion de force à distance, professent par là un *dynamisme* qui s'oppose aux doctrines cartésiennes

orthodoxes, doctrines purement *cinétiques* en ce que le mouvement y est l'élément fondamental[1].

Mais, d'autre part, doctrines newtoniennes et cartésiennes ne diffèrent que par un détail pour l'adversaire des doctrines mécanistes, de même que l'orthodoxe et l'hérétique ne présentent que des divergences insignifiantes au regard de celui qui rejette l'ensemble du dogme.

Jusqu'à quel point doit-on regarder comme atteint le résultat qui consiste à donner des forces newtoniennes une explication cartésienne? Divers exemples tendent à prouver qu'au moins le mouvement de la pensée scientifique est bien dirigé dans ce sens — ou plutôt, était dirigé dans ce sens il y a une quinzaine d'années — ; car à l'heure présente on ne sait pas trop comment se passer des attractions et répulsions entre électrons : et pour avoir réussi à ne plus admettre de forces à distance qu'à des distances infinitésimales, on n'a pas moins des forces à distance.

Au moment même où Coulomb découvrait la loi qui régit les actions entre les charges électriques répandues sur les conducteurs, Cavendish reconnaissait l'influence importante du *milieu* isolant qui sépare les conducteurs. Deux petites sphères isolées, électrisées, ne s'attirent pas avec la même force dans l'air et dans la benzine. C'est l'origine de l'idée puissante et féconde de Faraday, qui, non content d'affirmer que l'action s'exerce par l'intermédiaire de ce milieu auquel il donne le nom significatif de *diélectrique*, en arrive à regarder l'action totale et l'énergie comme localisées

1. Les newtoniens, d'autre part, professent l'*atomisme*, c'est-à-dire la réduction de toute réalité physique à un nombre fini de particules distinctes, entre lesquelles s'exercent les forces. Bien que, logiquement, l'atomisme et les systèmes mécanistes soient tout à fait indépendants, il y a, historiquement, solidarité entre atomisme et dynamisme.

dans ce milieu diélectrique. Au lieu de l'attraction exercée instantanément à toute distance et *ipso facto* par le seul fait de la présence du corps attirant, voici donc une action transmise de proche en proche par un milieu continu. L'influence, sinon prépondérante, du moins essentielle, de ce milieu n'est plus aujourd'hui mise en discussion.

La loi d'attraction universelle étant la même que la loi des actions électriques, ne peut-on admettre aussi que l'attraction s'exerce par communication successive, au moyen d'un milieu, d'un corps céleste à l'autre? On serait conduit, il est vrai, à penser que la communication de cette action à distance exige une certaine durée finie ; et, d'autre part, on ne peut être d'accord avec la réalité sans admettre des vitesses de propagation dépassant de beaucoup la vitesse de la lumière. Ce n'est pas dans la grandeur de cette vitesse de propagation que gît la plus grave difficulté. Mais il n'est déjà pas commode de se figurer la constitution mécanique d'un milieu susceptible de transmettre les actions électriques à distance ; et si l'on arrive jamais à une représentation mécanique satisfaisante d'un milieu capable de propager la gravitation, ce ne sera pas sans avoir essayé un nombre considérable de ces constructions compliquées dont se montre si prodigue l'imagination des physiciens anglais, et qui rappellent involontairement le mot de Pascal sur le système cartésien :

« Il faut dire en gros : cela se fait par figure et mouvement, car cela est vrai. Mais de dire desquels est composée la machine, cela est ridicule, car cela est inutile, et incertain, et pénible. »

Que ce soit « incertain et pénible », je n'aurai garde de le contester; mais je ne crois pas aussi profondément inutile de savoir de quoi est composée la machine, si l'on veut prouver que « cela est vrai ».

### § 8. — L'ATTRACTION A DISTANCE DANS UN MILIEU INCOMPRESSIBLE. LES SPHÈRES PULSANTES DE BJERKNES.

C'est pourquoi l'on doit réserver, dans l'histoire de la physique contemporaine, une place de choix à l'œuvre du géomètre et physicien norvégien Bjerknes, qui nous a fait comprendre comment de véritables attractions newtoniennes pouvaient naître entre des corps plongés dans un liquide, par le seul fait des mouvements de ces corps et de l'incompressibilité du milieu.

Qu'on imagine une toute petite sphère qui puisse, comme un ballon de caoutchouc, se gonfler et se dégonfler : si elle est reliée par un tube à un réservoir où la pression subit des variations alternatives, on verra son rayon augmenter et diminuer ; si ces variations alternatives de volume, à partir d'une dimension moyenne, restent petites, et si elles sont rapides, on aura ce que Bjerknes a appelé une *sphère pulsante*.

Plongeons dans une grande cuve d'eau deux sphères pulsantes : l'eau transmet de l'une à l'autre les changements de pression qui résultent des augmentations et des retraits de volume, et il en résulte une action de l'une sur l'autre. Deux sphères où la pulsation est de même signe, c'est-à-dire où les vibrations commencent ensemble et finissent ensemble, où les dilatations sont concomitantes et aussi les contractions, éprouvent, l'une pour l'autre, une attraction. La grandeur de cette attraction est en raison inverse du carré de la distance des sphères. Deux sphères pulsantes, à pulsations de signes contraires, se repoussent, au contraire, toujours suivant la même loi.

Bjerknes ne s'est pas contenté de prévoir ces résultats par le calcul. Il en a démontré l'exactitude dans d'ingénieuses expériences.

A distance suffisante, le résultat sera le même, qu'on opère avec des sphères ou avec des tambours plats. On prend donc une capsule plate dont le fond est formé d'une membrane de caoutchouc ou de baudruche. Si on insuffle de l'air dans la capsule, la membrane flexible se bombe en dehors; elle se bombe en dedans, si on fait dans la capsule un vide partiel.

La capsule est fixée au bout d'un tube creux horizontal, suspendu lui-même à un tube de caoutchouc vertical. Tube creux et boîte plongent dans l'eau. Si on insuffle de l'air par le tube vertical de caoutchouc, ou qu'on fasse, au contraire, le vide, les variations de pression se transmettent à la boîte qui, par son mode de suspension, est libre de se mouvoir horizontalement dans l'eau.

A quelque distance, dans le même plan horizontal et dans l'eau, on dispose une « boîte pulsante » à poste fixe.

Une petite pompe à air, comme une pompe de bicyclette, dont on aurait enlevé toute soupape empêchant l'air de se mouvoir librement dans les deux sens, permet de faire varier la pression à la fois dans les deux capsules : si le piston se déplace d'un ou deux centimètres, d'un mouvement alternatif qui se répète, la pression subira de petites variations dans les deux boîtes ; les variations seront de sens inverse, si les raccords, qui font communiquer le corps de pompe avec les deux boites, sont rattachés aux deux bouts du corps de pompe : le mouvement du piston raréfie l'air d'un côté, tandis qu'il le comprime dans l'autre. Avec deux raccords partant du même bout du corps de pompe, les pulsations sont synchrones, c'est-à-dire de même signe.

La capsule mobile est attirée vers la capsule fixe dans le cas de pulsations synchrones; elle est repoussée dans le cas de pulsations de signes contraires. La force attractive ou répulsive peut se mesurer : elle

est en raison inverse du carré de la distance des deux capsules.

On retrouve ainsi les lois de Coulomb pour les attractions et répulsions électrostatiques ou magnétiques, avec, il est vrai, un changement de signes. Ce sont les sphères pulsantes présentant entre elles une opposition de propriétés qui se repoussent, tandis que celles qui sont identiques s'attirent. Cette dernière particularité les rapproche des masses matérielles, pour lesquelles c'est une attraction qu'on observe entre corps identiques.

Le fils et le collaborateur de C.-A. Bjerknes, Victor Bjerknes, a étendu les mêmes méthodes de calcul à une catégorie voisine de forces résultant de pressions transmises par un fluide; et, dans une étude d'ensemble sur les *champs de force hydrodynamiques*, il a précisé les conditions dans lesquelles les tourbillons étudiés par Helmholtz et par lord Kelvin pouvaient donner lieu à des attractions et répulsions réciproques analogues aux actions des courants sur les courants que régissent les lois d'Ampère.

Dans des conditions qu'il précise, deux tourbillons tournant autour d'axes parallèles et tous deux dans le même sens, agissent l'un sur l'autre comme deux courants électriques parallèles; mais il y a encore, ici, une interversion de signes : deux tourbillons parallèles et de même sens se repoussent, tandis que deux courants parallèles et de même sens s'attirent. De même un tourbillon d'axe vertical contre lequel vient buter un large courant fluide horizontal subit, de la part de ce courant, une action mécanique qui tend à le déplacer dans une direction perpendiculaire à celle de ce courant, tout comme un courant électrique mobile éprouve, dans un champ magnétique, une force qui l'entraîne dans une direction perpendiculaire, de manière à lui faire couper le plus possible de lignes de force magnétiques.

L'intérêt de ce rapprochement des forces électrodynamiques et des forces hydrodynamiques réside dans cette circonstance que, pour le tourbillon fluide attaqué par un courant fluide, l'action mécanique s'explique sans effort par la composition de poussées élémentaires. C'est cette analogie des champs hydrodynamique et électrodynamique qui nous a dicté notre essai de justification théorique des règles de M. Gabriel Guilbert pour la prévision du temps. Ces règles, révélées à M. Guilbert par une longue pratique des cartes d'isobares, régissent le déplacement des grands tourbillons aériens que sont les bourrasques de nos régions, sous l'influence des courants aériens que sont les vents aux divers points de la surface de l'Europe.

Sans prétendre à un accord quantitatif, qui serait pourtant désirable, mais qui exigerait des calculs dont on ne voit pas nettement comment ils pourraient être conduits, nous sommes arrivés à un accord qualitatif assez encourageant pour montrer combien pourrait être féconde l'introduction, en météorologie, de ce rapprochement des tourbillons fluides et des courants électriques.

Quel que soit l'avenir réservé à cette extension, l'œuvre de Bjerknes garde une importance capitale, car elle a rendu tangible le fait que, dans certains cas, des attractions newtoniennes peuvent résulter de transmissions de pressions dans les fluides, sans qu'on ait à invoquer d'actions directes à distance.

### § 9. — LA THÉORIE CINÉTIQUE DE LA MATIÈRE EN GÉNÉRAL, ET LA RIGIDITÉ DES FLUIDES EN MOUVEMENT.

Une autre preuve de cette même tendance nous est fournie par les essais de lord Kelvin pour constituer une *théorie cinétique de la matière*. Ce n'est plus seu-

lement l'état gazeux qu'il cherche à expliquer par des mouvements et des chocs. Il fait la judicieuse remarque que, si la théorie cinétique des gaz envisage les molécules gazeuses comme de petites balles élastiques, elle n'aborde pas la question, plus délicate encore, de la nature de l'élasticité, qui fait rebondir ces balles après le choc. C'est à la matière solide elle-même que s'attaque lord Kelvin; et il essaie de montrer dans quel sens il faudrait poursuivre les recherches, pour arriver à faire concevoir l'élasticité des solides comme résultant à son tour du mouvement. La molécule solide, qui paraît essentiellement au repos, serait pour lui un système mobile, qui tiendrait de son mouvement même son pouvoir de résistance aux efforts qui tendent à la rapprocher ou à l'écarter des molécules avoisinantes.

Il est d'observation journalière qu'on peut réaliser des cas de stabilité et de raideur élastiques avec des corps en mouvement dépourvus eux-mêmes de rigidité. Une bicyclette bien lancée résiste à une forte impulsion qui tend à la renverser sur le côté, tandis que la même bicyclette au repos ne se tiendrait pas verticale, et que le doigt d'un enfant suffirait à la jeter à terre. Cette faculté de réagir contre une force extérieure qui tend à la déranger, elle la doit au mouvement et au mouvement seul. Encore la bicyclette n'est-elle pas un exemple excellent, car elle ne tourne pas sur place : mais la toupie nous fournit un modèle bien net, d'un corps solide qui semble au repos et qui a pourtant une stabilité purement dynamique. Lord Kelvin, dans ses conférences sur la *Dynamique moléculaire*, a donné d'autres exemples : une chaîne sans fin, flexible, tournant rapidement sur une poulie, se tient droite et raide un certain temps, si on la fait sauter hors de la poulie; un disque de caoutchouc mou peut acquérir, en tournant, la « raideur du bord d'un chapeau à la Rubens »; enfin, la belle expérience

des anneaux de fumée dégagés d'une ouverture circulaire percée dans une boîte, et qui, sur le point d'éprouver un choc l'un contre l'autre, s'écartent et se mettent à vibrer. On peut ainsi, avec des matériaux entièrement dépourvus d'élasticité, mais animés de mouvement, constituer des systèmes capables de résister aux déformations.

A l'usine hydroélectrique de MM. Bergès, à Lancey, on fait quelquefois l'expérience suivante : au lieu de diriger sur les dents d'une turbine l'eau qu'amène aux appareils une conduite forcée, de 500 mètres de hauteur verticale, on la dirige en l'air, sous forme de jet d'eau, par un ajutage vertical.

Le jet, de la grosseur du pouce, s'élèverait à 500 mètres de haut, s'il n'y avait pas la résistance de l'air : il possède, à la sortie du robinet, une vitesse énorme, d'environ 100 mètres à la seconde. Un jet liquide, animé de cette vitesse, acquiert la rigidité d'une barre de métal, et c'est avec surprise que l'on voit un homme vigoureux essayer vainement de couper le jet d'un coup de sabre.

Lord Kelvin a poussé la comparaison plus loin : il a montré comment on peut reproduire certaines propriétés, soit de la matière ordinaire, soit de l'éther lumineux, en leur assignant une constitution *gyrostatique*, c'est-à-dire en les regardant comme formés de molécules dont chacune tournerait à la façon d'une toupie : l'orientation dans l'espace de l'axe de rotation d'une toupie pouvant d'ailleurs changer, et entraîner, par des systèmes de liaisons plus ou moins ingénieusement compliqués, des changements corrélatifs dans l'orientation des axes des toupies voisines. Lord Kelvin enfin a développé, avec une particulière insistance, une hypothèse dont le titre seul était un hommage à l'une des idées les plus chères à Descartes, — l'hypothèse des *atomes-tourbillons*.



## § 10. — LE MOUVEMENT BROWNIEN.

Je ne saurais terminer cette énumération, sans dire un mot du *mouvement brownien*. Découvert par le naturaliste anglais Brown, ce phénomène a fait l'objet d'études récentes de M. Gouy. Dans le champ d'un microscope de puissance moyenne, une goutte d'eau, mise sur le porte-objet, offre à son intérieur le spectacle d'un mouvement continuel : une multitude de particules très ténues, détritus de matières organiques ou minérales s'agitent en tous sens, sans arriver jamais au repos. Bien différents et faciles à discerner sont les mouvements des êtres vivants microscopiques qui vivent dans la goutte d'eau. Les poussières inanimées se meuvent aussi, mais comme au hasard, sans que ce mouvement puisse être attribué en aucune façon à une trépidation de l'appareil, ni à l'effet de la lumière qui éclaire la goutte; les particules qui ont un demi-millième de millimètre se déplacent de part et d'autre avec une vitesse moyenne de quelques millièmes de millimètre par seconde. La vitesse est d'autant plus grande que la particule est plus ténue. Elle diminue si le liquide devient visqueux.

La théorie cinétique de la matière nous donnerait bien la clé du phénomène. Si les molécules, à l'état de repos apparent, sont néanmoins animées sans cesse de mouvements, une particule de matière à peine plus grosse qu'une molécule d'eau participerait au mouvement du milieu. Les molécules se heurtant et se choquant en tous sens, la particule heurtée par elles se déplacerait aussi en tous sens, d'une manière irrégulière et avec une vitesse comparable à celle des mouvements moléculaires, c'est-à-dire avec une vitesse de plusieurs centaines de mètres par seconde. Imagine-t-on une particule beaucoup plus grosse : elle est en contact à chaque instant avec un grand

nombre de molécules dont les chocs se contrarient en partie ; la masse à mouvoir étant bien plus grande, le même mouvement se produit, mais à une échelle bien plus réduite. Enfin, une particule trop grosse, ayant quelques centièmes de millimètre de dimension, reste absolument au repos.

« Les choses se passent de même à nos yeux, dit M. Gouy, sur une nappe d'eau agitée en tous sens, sur laquelle flottent des corps de dimensions diverses. Les plus petits de ces corps flottants sont agités comme l'eau elle-même ; plus grands, ils n'éprouvent que de faibles et rares déplacements ; plus grands encore, ils demeurent au repos. »

Et M. Gouy conclut que le « mouvement brownien nous fournit ce qui manquait à la théorie cinétique de la matière : une preuve expérimentale directe [1] ».

Nous avons énuméré quelques-uns des arguments, — peut-être serait-il plus juste de dire : quelques-unes des *manifestations de sympathie*, — que donnait au mécanisme cartésien la physique de la seconde moitié du XIXe siècle.

Avant d'aborder l'influence des découvertes tout à fait contemporaines sur les théories mécanistes, il reste à montrer sur quel terrain il semble, au contraire, que le mécanisme ait reculé.

1. *Revue générale des Sciences*, 1er janvier 1895.



## CHAPITRE XIX

## La crise du mécanisme. — II. La réaction contre le mécanisme : l'énergétique.

---

### § 1. — LA NAISSANCE ET LE DÉVELOPPEMENT DE L'ÉNERGÉTIQUE.

Triomphante dans tous les domaines, enhardie par des tentatives pour envahir jusqu'au champ réservé à l'idée newtonienne d'attraction à distance, épanouie dans la *Théorie mécanique de la chaleur*, il semblait que la physique cartésienne, vers le milieu du dernier demi-siècle, se vît proche du moment où, du rang de féconde hypothèse, elle serait promue au rang de doctrine scientifique incontestée.

C'est pourtant vers cette époque que, non seulement le cartésianisme proprement dit, mais le mécanisme et l'atomisme lui-même sont venus se heurter à des contradictions passionnées dont ils ont triomphé, en un sens, mais dont ils sont sortis transformés.

Dès 1855, dans son mémoire célèbre *On Energetics*, Macquorn Rankine préconisait une exposition didactique de la Thermodynamique qui ne fût pas fondée sur la théorie mécanique de la chaleur, au sens spécial du mot, et posait les bases de la science générale de l'énergie. Simple changement de méthode pédagogique, dans la pensée de Rankine, ce titre nouveau

devait devenir le mot de ralliement des adversaires du mécanisme.

Dans un article de 1907[1], Wilhelm Ostwald rappelle ce qu'est « l'énergétique moderne ». « Le mouvement énergétique a coïncidé, dit-il, avec un autre mouvement qui repose sur un fondement philosophique, et, sous le nom de *pragmatisme* ou d'*humanisme*, poursuit un but analogue. L'énergétique correspond donc à des besoins déterminés et bien actuels. »

L'une des thèses favorites du célèbre chimiste allemand est que l'idée de matière ne correspond pas à une réalité aussi bien définie et aussi concrète que l'idée d'énergie. « La science précédente avait bien tranquillement admis, à côté de la matière pesante, la matière impondérable, telle que la matière du feu, la matière électrique, etc. Et même chez Lavoisier, qui, le premier, donna clairement la détermination précise des rapports des poids comme le moyen de juger des réactions chimiques, on trouve encore, sous l'influence de la tradition, le calorique et la matière de la lumière dans la table des éléments chimiques... Mais, au cours du XIX[e] siècle, les atavismes s'évanouirent complètement, et l'on vit se développer le dualisme matière-force, où la matière joue le rôle de la substance au sens aristotélicien du mot, tandis que la force joue le rôle de l'accident. La matière est devenue par là le fond proprement réel des phénomènes, et les impondérables : chaleur, lumière, électricité, ont été relégués par là à une place inférieure. »

L'énergie, pour Ostwald, — comme pour Robert Mayer, qui l'appelait « force » — est un *objet* réel. S'il arrive à des écrivains de proclamer que, seule, la matière est une réalité, que l'énergie n'est rien de réel, mais seulement objet de pensée — *Etwas Gedachtes* —, « ces remarques ne prouvent pas autre chose que

1. *Rivista di Scienza,* t. I, p. 16.

ceci : à savoir que, dans l'esprit de ces auteurs, l'énergie n'est pas même objet de pensée, car, s'ils avaient réfléchi sur les rapports de cette idée et de l'idée de matière, ils se seraient abstenus de pareilles affirmations ». Tandis que la conservation de la matière est tenue pour chose toute naturelle, la conservation de l'énergie apparaît comme quelque chose de surprenant et d'admirable. C'est en ce point que s'oppose à la conception « matérialiste » l'énergétique moderne. Elle s'attache à faire de la réalité de l'énergie quelque chose de si clair, que « la vieille et digne matière n'ait pas à rougir d'être en pareille compagnie », en dépit de la prétendue impondérabilité de l'énergie. En second lieu, elle va jusqu'à renverser de fond en comble l'ordre des préséances : tandis que l'énergie est de plus en plus regardée comme une réalité, les droits de la matière au même honneur paraissent de moins en moins forts, et il ne lui reste que les droits qu'elle tient de la tradition.

Qu'est donc la matière? *Elle est le support de l'énergie de mouvement*, ou cinétique ; mais cette forme spéciale d'énergie n'a aucun titre à être considérée comme la forme-type, la forme la plus immédiatement tangible d'énergie. A ce point de vue, le terme « énergie potentielle » paraît fâcheux à Ostwald, car il implique l'idée que les autres formes d'énergie ne sont pas quelque chose d'aussi réel que l'énergie de mouvement. Or, si l'énergie de mouvement nous révèle sa présence par le heurt d'un corps doué de force vive, et si nous pouvons ainsi la toucher du doigt, ne peut-on dire aussi que nous *sentons* directement l'énergie calorifique ? L'énergie cinétique n'est pas, en soi, plus « actuelle » que n'importe quelle autre forme d'énergie qui peut se transformer en une autre : elle est, comme toute autre forme d'énergie, potentielle au regard de celle qu'elle produit, tandis que cette autre devient actuelle.

Toute quantité d'énergie peut être regardée comme un produit de deux facteurs : un facteur d'*intensité*, tel que la pression, la hauteur de chute, le potentiel électrique, la température; et un facteur de *capacité*, tel que le volume, le poids, la quantité d'électricité, etc. Le facteur de capacité représente toujours une grandeur susceptible d'être ajoutée à une grandeur de même espèce, et, par suite, *mesurable* au sens ordinaire du mot; on ajoute un volume à un volume, un poids à un poids; tandis que le facteur d'intensité représente *un niveau* auquel est portée la grandeur capacité, et nous ne saurons pas nécessairement comment nous y prendre pour ajouter un niveau à un autre : ce que nous pouvons toujours faire, c'est de repérer ces niveaux sur une échelle.

« Pour qu'il se passe quelque chose, il faut qu'on ait quelque part des différences d'intensité non compensées. » C'est sous cette forme qu'Ostwald énonce le principe de Carnot.

La masse est, dans ce mode de langage, une *capacité d'énergie*, tout comme le volume et le poids : c'est la capacité qui, multipliée par le carré de la vitesse, — facteur d'intensité, — donne l'énergie de mouvement. Nous reconnaissons dans les plus usuelles et les plus familières de ces capacités d'énergie — à savoir celles qui correspondent à l'énergie de compression, à l'énergie de gravitation et à l'énergie de mouvement — les vieilles « qualités premières de la matière ». Les « qualités secondes » ne sont que des capacités d'énergie qui n'ont pas de rapports aussi usuels avec nos habitudes que les premières. Si l'on fait abstraction de quelques outrances de langage, l'énergétique ne dit pas : « la masse ne correspond pas à une propriété réelle »; elle dit simplement : « la masse ne joue pas dans la nature un rôle tel qu'on en fasse une propriété tout à fait à part et d'importance primordiale ». Elle professe que l'addition des masses et la conser-



vation de la masse dans les réactions chimiques n'a pas, en soi, une importance plus grande — ni peut-être une exactitude fondamentale plus absolue — que, par exemple, l'addition des volumes dans le mélange des gaz à peu près parfaits qui se mélangent à pression constante. M. Le Châtelier donne expressément la loi de Lavoisier comme un simple cas particulier de ce qu'il nomme la « loi de la conservation de la capacité de puissance motrice ».

### § 2. — POLÉMIQUES. LE DISCOURS D'OSTWALD.

En essayant d'apprécier la véritable pensée des partisans de l'énergétique, nous avons formulé une réserve : « Si l'on fait abstraction de quelques outrances de langage... » Ces outrances n'ont pas été toujours évitées et elles ont, à bon droit, scandalisé les admirateurs des anciennes disciplines scientifiques. C'est ainsi qu'Ostwald cédait à ce goût du paradoxe, lorsqu'au Congrès des naturalistes allemands, en 1895, à Lübeck, il prononçait son discours retentissant sur la banqueroute du matérialisme scientifique : *die Ueberwindung des wissenchaftlichen Materialismus*.

« De tout temps, on s'est plaint d'être si peu d'accord sur les questions fondamentales qui intéressent le plus l'humanité. C'est de nos jours seulement que ces plaintes se sont tues : en fait, chose rare à toute autre époque, il règne aujourd'hui, à part quelques divergences encore, un accord presque complet en ce qui concerne la conception du monde extérieur. Notre siècle est le siècle du naturalisme. Interrogez le premier venu, pénétré des idées naturalistes, depuis le mathématicien jusqu'au médecin praticien ; demandez-lui son avis sur la constitution intime du monde. La réponse sera invariablement la même : « Toutes choses sont formées d'atomes en mouvement ; ces atomes et les forces qui

agissent entre eux sont les dernières réalités dont se composent les phénomènes particuliers. » Partout on répète, en manière d'axiome, que seule la mécanique des atomes peut donner la clef du monde physique. Matière et mouvement, tels sont les deux concepts auxquels on ramène en dernière analyse les phénomènes naturels les plus complexes. A cette théorie, on peut donner le nom de *matérialisme physique*.

« Je veux exprimer ici ma conviction que cette manière de voir, malgré tout son crédit, est insoutenable; que cette théorie mécanique n'a pas atteint son but, car elle se trouve en contradiction avec des vérités tout à fait hors de doute et universellement acceptées. La conclusion s'impose : il faut l'abandonner et la remplacer, autant que faire se peut, par une autre meilleure. On se demandera naturellement : En existe-t-il une meilleure? A cette question, je crois pouvoir répondre par l'affirmative. »

Abordant la théorie des ondulations en optique, Ostwald avait l'imprudence de dire :

« Pourtant, les jours de la théorie des ondulations étaient aussi comptés; à notre époque, cette théorie a été enterrée sans bruit, pour faire place à la théorie électromagnétique. Faisons l'autopsie de son cadavre : la cause de la mort nous apparaîtra évidente : elle a péri par ses parties mécaniques... »

Une telle exécution, aussi injuste que sommaire, était bien faite pour provoquer l'indignation de M. Cornu. Avec une vivacité extrême, l'éminent physicien dénonça le novateur irrespectueux envers une doctrine qui avait contenté tous les grands esprits depuis trois siècles, et opposa aux « aspirations vagues » de l'énergétique les « notions claires et fécondes » de la mécanique rationnelle. La réponse de Cornu reste comme la preuve qu'en 1895 des savants remarquables ignoraient tout à fait qu'il y eût une question du mécanisme. « Ayant charge d'âmes », ils

ne cherchaient pas à savoir si des questions nouvelles ne se posaient pas.

M. Brillouin tenait au contraire le langage d'un physicien averti : « Il y a quelque quinze ans, alors que les théories, aujourd'hui en vogue, n'avaient pas conquis la faveur publique, je crois avoir prémuni quelques générations de jeunes gens, dans la mesure de mon action comme professeur, contre les excès de représentation matérielle auxquelles on se livrait souvent, en électricité surtout; je crois qu'il est temps maintenant de réclamer un peu pour cette pauvre matière que nous ne connaissons que par ses qualités, je le veux bien, mais dont nous ne connaîtrions guère les qualités si elle n'existait pas[1]. »

La lecture de l'article de M. Brillouin et de la réplique d'Ostwald suffit à montrer sur quels points, depuis treize ans, les idées ont changé. L'un des arguments de M. Brillouin « pour la matière » était « que la transmutation des métaux est devenue chimérique ». Par contre, M. Ostwald affirmait l'infécondité désormais acquise des théories atomistiques.

Le reproche que j'adresserai à l'énergétique, c'est le reproche qu'adressait à la doctrine du calorique M. Poincaré; en habituant à parler de l'énergie comme d'une réalité fondamentale, elle habitue à l'idée que « rien ne se perd », et que, dans les transformations qu'elle subit, l'énergie utilisable ne s'évanouit pas. Cette vue des choses a ses avantages. M. Langevin a conté que Curie disait : « Je vois l'énergie ». Peut-être ce langage a-t-il néanmoins l'inconvénient de donner un relief excessif à l'idée d'énergie par rapport à l'idée, qui correspond à une réalité plus profonde de « puissance motrice ».

Le succès de l'énergétique est venu, en somme, — et c'est ce que méconnaissaient les physiciens tels

1. *Revue générale des Sciences,* 1895.

que Cornu, dont les travaux étaient toujours restés très éloignés de la chimie, — du magnifique développment de la physicochimie. Cette science nouvelle doit bien peu au mécanisme. Gibbs, qui en a été le principal ouvrier, l'a constituée tout à fait en dehors des hypothèses atomistiques, et elle fournit un exemple très caractéristique d'une grande doctrine reposant sur une série de lois, de principes, faits d'expériences généralisés, qui n'ont pas la prétention de réduire les phénomènes à des phénomènes d'une autre espèce : la loi des phases, la loi du déplacement de l'équilibre sont des énoncés où n'entre rien d'hypothétique, et qui ne supposent aucune spéculation sur la substance, — à peine un langage qui se ressent des habitudes d'esprit mécanistes : tel le mot *thermodynamique* lui-même, et l'expression d'*équilibre*, empruntée à la statique et transportée dans la chimie.

### § 3. — LA THÉORIE MÉCANIQUE FAUX IDÉAL DE THÉORIE PHYSIQUE D'APRÈS DUHEM.

Ce n'est pas tout à fait au même point de vue que s'est placé M. Duhem. La préoccupation d'élaborer une doctrine de la théorie physique lui a fait ouvrir une voie dans laquelle il a eu d'illustres successeurs, mais où il a été en France un initiateur, et lui a dicté d'admirables ouvrages de logique scientifique, que sont venues appuyer des études historiques sur la transmission et le développement de la mécanique dans les écoles du moyen âge. Sur la matière même, M. Duhem ne va jamais aussi loin qu'Ostwald. Mais sur le rôle et l'utilité de l'hypothèse mécaniste, en physique, il ne se montre pas moins tranchant. La théorie mécanique en physique est, pour lui, un faux idéal. Si la préoccupation de chercher l'explication mécanique d'un phénomène a pu mettre parfois les savants sur le chemin des découvertes, elle a été en réalité

beaucoup moins féconde qu'on n'a coutume de le répéter. Non content d'affirmer, M. Duhem apporte, en faveur de sa thèse de l'inutilité des représentations mécanistes, des exemples saisissants.

On ne peut que souscrire d'une façon absolue à sa manière de voir, quand il cite l'exemple de la célèbre découverte de Fresnel sur la forme de la surface d'onde dans les cristaux.

« Comment y parvint-il? » — dit M. Duhem, dans son beau livre sur *La théorie physique, son objet et sa structure.* — « En cherchant une explication du mode de propagation de la lumière dans les cristaux? Nullement, mais par une intuition de géomètre où aucune hypothèse sur la nature de la lumière ou sur la constitution des corps transparents n'avait de place... Cette audacieuse intuition a été couronnée du plus éclatant succès; non seulement la théorie proposée par Fresnel s'est accordée minutieusement avec toutes les déterminations expérimentales, mais encore elle a fait deviner et découvrir des faits imprévus et paradoxaux que l'expérimentateur, livré à lui-même, n'aurait jamais eu l'idée de rechercher; telles sont les deux espèces de réfraction conique; le grand mathématicien Hamilton a déduit de la forme de la surface d'onde des cristaux biaxes les lois de ces étranges phénomènes, que le physicien Lloyd a ensuite recherchés et découverts. La théorie de la double réfraction biaxale possède donc cette fécondité et ce pouvoir de divination où nous reconnaissons les marques d'une classification naturelle; et cependant, elle n'est pas née d'un essai d'explication. Non pas que Fresnel n'ait tenté d'expliquer la forme de surface d'onde qu'il avait obtenue; cette tentative le passionna même à tel point, qu'il ne publia pas la méthode qui l'avait conduit à l'invention...[1] »

1. P. Duhem. *La Théorie physique, son objet et sa structure.* Paris, Chevalier et Rivière, 1906, p. 56, 57.

La recherche d'une explication mécanique n'a été pour rien dans une des grandes découvertes de Fresnel. L'exemple n'est pas isolé. Nombre de découvertes dont les auteurs sont des physiciens mécanistes convaincus leur ont été suggérées de même par des *intuitions* où leurs doctrines mécanistes ne sont pour rien. M. Duhem a fait voir comment, chez les savants les plus friands de comparaisons mécaniques, les physiciens anglais, la théorie mécanique est beaucoup moins un mode de classification logique qu'un *modèle mécanique*, et comment cette recherche systématique du modèle caractérise un type particulier d'esprit, plus répandu en Angleterre que sur le continent, l'esprit accessible au concret, moins apte à spéculer dans l'abstraction qu'à se conduire, sans s'y perdre, dans le dédale des choses concrètes les plus compliquées.

Lord Kelvin déclarait : « Quand j'ai réussi à construire pour un phénomène un modèle mécanique, je comprends; quand je n'ai pas réussi, je ne comprends pas. » C'est ainsi que, pour lui, la théorie électromagnétique de la lumière n'était pas une explication de la lumière, et ne pouvait mériter le nom d'explication que le jour où, de l'électricité elle-même, on aurait donné un « modèle mécanique » satisfaisant. Il est bien certain que, pour lord Kelvin, *l'intelligence d'un phénomène* a un sens un peu plus restreint, — et en tout cas un peu autre, — que celui qu'il a pour Descartes. Par explication mécanique, Descartes et les cartésiens français n'entendent pas seulement la construction d'une image concrète et conforme qui facilite à leur esprit la compréhension des choses, mais ils entendent la découverte de la réalité vraie, de la réalité dernière, du *substratum* métaphysique, et, par-dessus tout, la réduction réelle à un nombre moindre des phénomènes distincts qui se passent dans l'univers.



### § 4. — LE CARTÉSIANISME GÉNÉRALISÉ : LA RÉDUCTION DE QUALITÉS SECONDES A DES QUALITÉS PREMIÈRES, MÉCANIQUES OU NON.

C'est cet idéal de réduction réelle des phénomènes physiques à un nombre minimum de phénomènes fondamentaux, — c'est, si l'on veut, un *cartésianisme généralisé*, — qui ne me paraît pas aussi infécond que le déclare M. Duhem, et que ne saurait suppléer la simple recherche d'une *classification naturelle*. En rendant compte, en 1894, de la traduction française des *Conférences scientifiques et allocutions de lord Kelvin*, que venait de publier M. Lugol, j'opposais cette manière de voir sur l'intelligence du phénomène, à la conception du « modèle mécanique » de lord Kelvin.

Je citais d'abord un passage de lord Kelvin :

« Je ne suis jamais satisfait, tant que je n'ai pu faire un modèle mécanique de l'objet ; si je puis faire un modèle mécanique, je comprends ; tant que je ne puis pas faire un modèle mécanique, je ne comprends pas ; et c'est pour cela que je ne comprends pas *la* théorie électromagnétique de la lumière. Je crois fermement en *une* théorie électromagnétique de la lumière ; quand nous comprendrons l'électricité, le magnétisme et la lumière, nous les verrons comme des parties d'un tout ; mais je demande à comprendre la lumière le mieux possible sans introduire des choses que je comprends encore moins. Voilà pourquoi je m'adresse à la Dynamique pure[1]. »

Et j'ajoutais :

« Si l'on arrive à établir définitivement cette proposition qui résume *la* théorie électromagnétique :

1. Lord KELVIN. Conférences scientifiques et allocutions (Constitution de la matière), traduites et annotées par M. P. Lugol, avec des notes de M. Brillouin. Paris, Gauthier-Villars, 1893.

« La cause des sensations lumineuses est un phénomène électromagnétique d'un genre spécial », il me semble qu'on aura *compris* la lumière, aussi bien qu'on a *compris* le son quand on a prouvé que la cause des sensations auditives est un mouvement de la matière ordinaire qui satisfait à des conditions spéciales.

« Si l'optique devenait un chapitre de l'électromagnétisme comme l'acoustique est un chapitre de l'élasticité, il resterait à comprendre l'électricité et le magnétisme, comme aussi bien il reste à comprendre la matière élastique, *mais il ne resterait plus à comprendre la lumière*[1]. »

La théorie électromagnétique est, pour moi, *explicative* au sens cartésien du mot, en ce sens qu'elle réduit réellement des qualités secondes à des qualités premières. Et elle est très préférable, non certes à la théorie des ondulations lumineuses proprement dites, — car elle n'est que cette théorie des ondulations elle-même, à laquelle se superpose un sens particulier donné aux grandeurs qui y interviennent, — mais à la théorie mécanique que l'on confond trop avec la théorie des ondulations, non sans avoir pour excuse de cette confusion l'exemple de Fresnel lui-même.

En définitive il faut savoir gré à M. Duhem d'avoir montré le rôle et la fécondité, trop méconnus, de la théorie physique indépendante de toute hypothèse explicative, et qui ne vise qu'à être synthèse de lois et classification naturelle ; il faut lui savoir gré d'avoir, dans des pages définitives, revendiqué les droits de la logique contre le droit à l'incohérence qui commençait, en certains milieux, à s'afficher. Mais en contestant les services rendus à la science par la conception métaphysique et objectiviste de la théorie explicative, qui prétend résoudre réellement les

1. *Bulletin des Sciences mathématiques,* 2e série, t. XVIII, p. 31 : février 1894.

« qualités secondes » de la matière en un très petit nombre de « qualités premières », il émet une affirmation trop absolue, que dément toute l'histoire de la science de ces dix dernières années.

Au contraire, l'idée *cartésienne généralisée*, de la réduction réelle des phénomènes physiques à l'unité, telle que nous l'énoncions en 1894, à propos de la théorie électromagnétique de la lumière, nous semble éminemment compréhensive. Elle laisse notamment le champ libre à tout essai de réduction de la matière et de l'électricité à une seule notion primordiale. Que cette réduction se fasse, comme le voudrait le cartésianisme entendu au sens étroit du mot, par une explication de l'électricité par la matière, — ou bien qu'elle se fasse, comme le suggèrent les découvertes récentes, par l'explication de la matière par l'électricité, — elle est, dans les deux cas, *explicative* au même titre, au sens que nous donnions à ce mot il y a quatorze ans. Nous examinerons par la suite si ce n'est pas plutôt dans le sens marqué par la seconde des hypothèses qu'il conviendrait d'orienter désormais la recherche théorique et philosophique.

# CHAPITRE XX

## La crise du mécanisme. — III. Le nouvel aspect de l'atomisme.

---

### § 1. — NOUVELLES DONNÉES SUR LA GRANDEUR ET LA DIVISIBILITÉ DES MOLÉCULES.

Les résultats définitivement acquis dans ces dernières années à la physique des atomes peuvent être résumés dans les propositions suivantes :

Un litre d'un gaz quelconque, à la pression atmosphérique normale, contient un nombre bien déterminé de molécules : environ 40.000 milliards de milliards ou 40 milliards de trillions.

Ces molécules se subdivisent elles-mêmes en atomes, liés entre eux par des forces d'ordre chimique ; la molécule des gaz simples les plus répandus : oxygène, hydrogène, azote, est formée de deux atomes identiques ; la molécule de la vapeur de mercure et de la plupart des nouveaux gaz de l'air : argon, hélium, est constituée par un seul atome du gaz.

Les charges électriques qui interviennent, soit associées à des atomes entiers, soit associées à des fragments d'atomes, sont toujours des multiples entiers d'une charge élémentaire, qui constitue « l'atome d'électricité », ou *électron*, et qui est égale à *un dix-trillionième de microcoulomb* (le coulomb étant

l'unité pratique de charge électrique, et le micro-coulomb le millionième du coulomb).

L'atome matériel lui-même peut, sous certaines influences « ionisantes » : rayons de Rœntgen, rayons du radium, décharges électriques, — être brisé en morceaux, de manière à livrer des fragments dont la masse est la deux millième partie de la masse du plus petit atome connu, l'atome d'hydrogène. Ce fragment, toujours associé à un électron d'électricité négative, est le *corpuscule* constituant élémentaire que l'on retrouve dans la décomposition des atomes de tous les corps simples. Le nombre de ces corpuscules identiques est seulement proportionnel au poids atomique. Tous les atomes des corps simples paraissent formés d'un noyau central associé à une charge électrique positive, autour duquel gravitent un nombre plus ou moins grand de corpuscules négatifs. L'identité des derniers éléments constituants de tous les atomes serait la preuve de l'unité de la matière.

Le noyau central et positif de chaque atome reste encore ce qui nous est le plus mystérieux. Mais le corpuscule négatif a été mieux étudié, et toutes les expériences les plus diverses ont conduit à cette conclusion qu'il n'est pas autre chose que de l'électricité toute pure, qu'une charge unité ou un dix trillionième de microcoulomb d'électricité négative à laquelle rien d'autre ne vient s'ajouter. *L'inertie* qui mesure la résistance opposée par la matière à la mise en mouvement se réduit, pour le corpuscule, à *l'inertie électromagnétique* qui résulte de la résistance que rencontre la création du champ électromagnétique par le mouvement d'une charge électrique.

Nous ne pouvons songer ici à décrire, dans leur complexité, les expériences par lesquelles on a établi ces conclusions. Nous renverrions le lecteur curieux de détails à d'autres ouvrages, et particulièrement à

la *Physique moderne* de M. Lucien Poincaré. Il est essentiel, néanmoins, de donner une idée des expériences essentielles, ne fût-ce que pour permettre de graduer la dose de confiance à attribuer aux diverses propositions qui précèdent.

La matière est-elle divisible à l'infini? Depuis des milliers d'années, la question a mis aux prises les philosophes, avant qu'on ait songé à la bien poser. Lord Kelvin lui a attribué, l'un des premiers, un sens bien défini : « Se demander si l'on peut diviser un morceau de verre en fragments d'un diamètre inférieur à un cent-millionième de centimètre, et continuer la division indéfiniment, sans le détruire et lui faire perdre les propriétés du verre, de même qu'une brique n'a pas les propriétés d'un mur de briques, c'est se poser une question très pratique. » Dans une de ses belles conférences sur la constitution de la matière, lord Kelvin concluait que les diverses parties de la physique : capillarité, élasticité, électricité, optique, chaleur, s'accordent à nous représenter la matière comme discontinue et constituée par la juxtaposition de particules élémentaires.

Les dimensions de ces particules élémentaires dans un corps ordinaire ne sont pas d'une petitesse infinie : dans les liquides ou les solides, elles varient de 1 cent-millionième à 1 ou 2 millionièmes de millimètre. « Agrandissons, dit lord Kelvin, une sphère d'eau ou de gaz de la grandeur d'un *ballon de barette* (d'à peu près 15 centimètres de diamètre), jusqu'à lui donner la dimension de la terre, chaque molécule étant amplifiée dans la même proportion. La sphère ainsi amplifiée aurait une structure intermédiaire entre celle d'un amas de grains de plomb et celle d'un amas de ballons de barette. »

Que les molécules gazeuses soient des centres de force ou des masses de matière inerte, qu'elles soient

des blocs sphériques ou des édifices compliqués, elles sont des unités qu'on peut dénombrer. Les étoiles du ciel et les grains de sable du bord de la mer sont les images traditionnelles employées pour faire concevoir les grands nombres ; ces étoiles et ces grains de sable sont pourtant des unités séparées, des grandeurs discrètes. Il en est de même des molécules d'hydrogène contenues dans un litre d'hydrogène. Toute la physique déjà nous inclinait à croire qu'il n'y en a pas beaucoup plus que quelques milliards de trillions, quand les recherches sur l'ionisation des gaz ont transformé cette probabilité en certitude.

### § 2. — LES IONS ET L'IONISATION.

Les mots d'*ion*, d'*ionisation*, se rencontrent à chaque ligne dans les publications relatives aux rayons Rœntgen et aux corps radioactifs. Qu'est-ce qu'un ion?

Le mot fut employé pour la première fois par Faraday, dans ses recherches sur la décomposition des solutions salines par le courant électrique. Dans cette décomposition, qu'on appelle l'*électrolyse*, la molécule chimique est coupée en deux : l'atome de métal qu'elle renferme descend le courant, et vient se déposer sur le pôle négatif ; c'est au pôle négatif que, dans la dorure et l'argenture galvanique, il faut placer les objets métalliques que l'on veut recouvrir d'une lame d'or ou d'argent. Le reste de la molécule, que ce soit un atome ou un groupement d'atomes, remonte le courant électrique et vient se porter sur le pôle positif. Dans l'électrolyse du sel marin, qui est du chlorure de sodium, le sodium descend le courant, le chlore le remonte.

C'est à ces deux morceaux de la molécule chimique, que sépare le courant, que Faraday attribuait le nom

d'*ions*, du grec ἰέναι, *marcher*. Ce sont ces deux morceaux de molécule en marche, qui sont les véhicules de l'électricité. Le métal apporte au pôle négatif de l'électricité positive; le reste de la molécule, ou *radical électronégatif*, apporte au pôle positif de l'électricité négative : et ce sont ces deux files d'ions, marchant en sens inverse, qui propagent le courant à travers la solution ; l'électricité ne s'y transmet que par *convection*.

A l'état normal, la molécule complète n'est pas chargée d'électricité : elle est à l'état neutre. Des actions spéciales, comme la dissolution en liqueur étendue, la dissocient en ses deux ions, chacun des deux portant une charge électrique égale et de signe contraire à l'autre. Il suffira de placer dans la solution deux lames métalliques reliées aux deux pôles d'une pile, pour que chacun de ces deux pôles attire les ions chargés d'électricité contraire à la sienne.

Avec quelle vitesse se déplacent ces ions? Leur vitesse dépend de leur nature; elle n'est pas la même pour des ions de deux métaux différents; mais elle a pu être mesurée. Entre deux électrodes distantes d'un centimètre et présentant entre elles une force électromotrice de 1 volt, un ion-hydrogène se déplace avec une vitesse de $0^{mm},0337$ par seconde; un ion-sodium, également positif, avec une vitesse notablement moindre, et qui n'est que de $0^{mm},0046$ par seconde. Un ion-chlore, négatif, a une vitesse en sens opposé, égale à $0^{mm},0068$ par seconde.

Ces divers ions transportent tous la même quantité d'électricité : c'est la grande loi de Faraday qui a montré que, pour décomposer le même nombre de molécules de sels différents, il faut, en employant le même courant, le même temps. 1 gramme d'hydrogène transporte toujours avec lui 96.500 coulombs. Un poids équivalent d'argent, 108 grammes, transporte avec lui exactement la même quantité d'électricité.

La chimie nous apprend en effet que l'atome d'argent est 108 fois plus lourd que l'atome d'hydrogène; elle nous fait connaître les poids *relatifs* des divers atomes : c'est ce qu'on appelle les *poids atomiques*, Mais elle ne nous apprend rien sur le problème. autrement important, et que nous essaierons d'aborder ici, du poids absolu de l'atome.

L'une des propriétés des rayons X qui fut aperçue de prime abord, est la propriété de décharger les conducteurs électrisés sur lesquels ils tombent. Il n'est pas nécessaire que les rayons X tombent sur le conducteur lui-même; il suffit qu'ils rencontrent le gaz interposé entre deux conducteurs de signes contraires. Faraday a donné aux physiciens l'habitude de concevoir l'espace isolant qui sépare deux conducteurs comme sillonné de *lignes de force* électrique qui, parties du conducteur positif, vont aboutir au conducteur négatif, et, comme des cordons élastiques, tendent à se raccourcir et à tirer l'un vers l'autre les deux conducteurs. Une particule électrisée, rendue libre dans l'espace, suivrait la ligne de force qui passe par le point où elle est, et irait aboutir au conducteur négatif si sa charge est positive, au conducteur positif si elle est négative. C'est précisément ce chemin que nous allons voir suivre aux *ions* gazeux, positifs ou négatifs, libérés dans l'air par les rayons X.

En l'absence de rayons X, le gaz que sillonnent les lignes de force est isolant; les ions positifs et négatifs ne sont pas séparés les uns des autres : on n'a que des molécules neutres, et les conducteurs restent chargés. Le rôle du faisceau de rayons Röntgen est de *libérer des ions*, c'est-à-dire des particules matérielles mobiles chargées d'électricités contraires. Comme cette libération s'effectue même dans les gaz dont la molécule est constituée par un

seul atome, on est certain qu'il n'y a pas simplement, comme dans l'électrolyse, cassure d'une molécule en atomes chargés, mais segmentation de l'atome lui-même.

Une fois libérés en un point, les ions gazeux se diffusent dans le reste du gaz, s'ils ne sont pas soumis à une action électrique. S'ils sont au voisinage de corps électrisés, ils se déplacent dans le champ électrique, montant ou descendant les lignes de force suivant le signe de leur charge, et allant ainsi décharger les conducteurs électrisés. La vitesse de leur déplacement dépend naturellement de la grandeur du champ électrique : elle dépend en outre, comme pour les ions métalliques en solution, de la nature de l'ion lui-même : la *mobilité* de divers ions dans un champ électrique donné est caractéristique de chaque gaz, et, pour un même gaz, elle varie souvent avec le signe de la charge de l'ion.

C'est ainsi que pour l'air sec, dans les conditions normales, la *mobilité* est d'à peu près un centimètre par seconde pour les ions positifs, et dix-huit millimètres pour les ions négatifs, dans un champ de un volt par centimètre : ce sont des vitesses beaucoup plus grandes que celles des ions en solution.

Le physicien anglais Wilson, élève de J.-J. Thomson, a donné une méthode d'étude des ions gazeux qui est particulièrement élégante en ce qu'elle permet de compter, — on pourrait dire de voir de nos yeux, — ces étranges véhicules d'électricité qui pouvaient paraître, avant ses expériences, de simples êtres de raison.

Wilson a eu recours à des expériences de condensation. Si l'on détend brusquement de l'air humide saturé de vapeur d'eau, il se refroidit et la vapeur se condense : le vase où se fait l'expérience se remplit d'un brouillard plus ou moins dense, suivant le degré où l'on a poussé la détente. Il arrive pourtant que

cette condensation n'ait pas lieu et que l'air puisse rester sursaturé de vapeur d'eau sans que sa transparence soit altérée : c'est ce qui aura lieu si l'on a soin de débarrasser l'air du moindre grain de poussière. Dans un vase primitivement vide où l'on ne fait pénétrer l'air qu'à travers des tampons de coton, on arrive à produire des détentes sans que l'air saturé donne lieu au moindre brouillard. On a pu obtenir ainsi une masse d'air parfaitement transparente et contenant jusqu'à huit fois le poids de vapeur d'eau nécessaire pour la saturer. La poussière, au contraire, empêche la sursaturation et provoque la condensation, parce qu'elle fournit des noyaux autour desquels peuvent plus aisément se former les gouttes d'eau : ce sont des sortes de germes autour desquels la production des gouttes est facilitée ; et l'exclusion de ces germes a pour résultat de retarder la condensation. Ces expériences délicates font songer aux expériences de Pasteur sur les générations spontanées.

Cependant, ici, en l'absence de tout germe, il arrive toujours un moment où une détente assez forte provoque une condensation spontanée; et, dans l'air bien débarrassé de poussière, cette condensation spontanée se produit à peu près au moment où la masse de vapeur d'eau a huit fois la valeur qui correspond à la saturation.

La théorie et l'expérience montrent que des noyaux de condensation électrisés facilitent plus encore le dépôt des gouttes d'eau dans une atmosphère humide. Et l'on peut, en effet, dans un air humide privé de poussières, provoquer une condensation aisée et abondante en dirigeant sur cet air humide, à travers le verre du vase qui le renferme, un faisceau de rayons X. *Les centres sur lesquels se produisent les gouttes d'eau sont bien les ions mis en liberté par les rayons X.* On l'a démontré par les expériences les plus variées. Si on a fait agir un champ électrique

avant de produire la détente, les gouttes ne se produisent plus aux mêmes points : les centres de condensation ont été entraînés, les uns dans le sens des lignes de force, les autres en sens inverse. On a pu, après une émission instantanée de rayons X, grouper et arrêter ensemble les ions à charge positive ou les ions à charge négative, et étudier séparément ceux qui restent. On a constaté, par là, que les ions négatifs provoquent la condensation plus vite que les ions positifs, ce qui expliquerait que, dans la haute atmosphère, la condensation se fasse de préférence sur les ions négatifs, et qu'ainsi la pluie entraîne vers le sol de l'électricité négative, laissant répandue, dans les couches élevées de l'air, de l'électricité positive.

Mais le principal intérêt des expériences de Wilson est leur intérêt philosophique. Elles ont, pour la première fois, rendu perceptible à nos sens la structure atomique de la matière, et, du même coup, la structure discontinue de l'électricité. Elles ont permis de compter les centres chargés sur lesquels se condensent les gouttes ; on vérifie d'ailleurs qu'il se forme une goutte sur un centre électrisé, et qu'à chaque goutte correspond un centre et un seul. En recueillant le brouillard qui tombe, on peut mesurer la charge électrique totale. Comme les météorologistes savent compter les gouttes d'un brouillard, on arrive à compter les ions et, par suite. on sait quelle est la charge électrique de chaque ion. On trouve ainsi, nous l'avons indiqué déjà, que la charge d'un noyau, la charge-unité, est d'un dix-trillionième de microcoulomb.

C'est la même charge-unité qui est associée à l'atome d'hydrogène dans l'électrolyse de l'eau, à l'atome de sodium dans l'électrolyse du sel marin, à l'atome d'argent dans l'électrolyse d'un bain d'argenture. Comme un gramme d'hydrogène transporte 96.500 coulombs — ou à peu près 100.000 coulombs, — un dix-trillio-

nième de microcoulomb est transporté par un cent-millième de dix-trillionième de microgramme[1] d'hydrogène. *L'atome d'hydrogène pèse donc un trillionième de trillionième de gramme*, et il est aisé de savoir combien en tient un litre.

### § 3. — LE PLUS PETIT CORPUSCULE D'ÉLECTRICITÉ ET SA CHARGE ÉLECTRIQUE.

Il est possible d'aller plus loin. Les rayons Röntgen se produisent, comme on le sait, dans des tubes à gaz raréfiés, traversés par les décharges. La cathode, ou électrode négative, de ces tubes, reliée au pôle négatif d'une machine électrique ou d'une bobine d'induction, émet un rayonnement spécial, le *rayonnement cathodique*, qui est formé de corpuscules matériels chargés d'électricité négative.

Ces corpuscules, en venant heurter une paroi de verre ou de platine, donnent naissance aux rayons de Röntgen.

Les rayons cathodiques proviennent d'une véritable *émission*. Ils sont déviés par l'aimant, comme le serait un simple fil parcouru par un courant électrique. Les rayons Röntgen consistent, au contraire, en un ébranlement de l'éther se transmettant par ondes, et qui a pour point de départ le choc des particules cathodiques arrêtées brusquement par un obstacle matériel.

J.-J. Thomson et les physiciens de Cambridge ont étudié avec soin le phénomène de la déviation des rayons cathodiques par l'aimant. Ce phénomène, tout le monde l'a observé avec les premiers tubes employés pour produire les rayons X, les tubes de Crookes. Dans ces tubes où la pression du gaz a été réduite à

1. C'est-à-dire *millionième de gramme.* Le préfixe *micro* désigne toujours un millionième de l'unité.

quelques millièmes de millimètres de mercure, un faisceau de rayons part de la cathode et va projeter une tache phosphorescente, verte ou jaune, sur le fond du tube, sur la paroi de verre opposée à la cathode. Si on approche un aimant, on voit la tache se déplacer, et en sens opposé si on change le pôle présenté au tube. De ces expériences de déviation magnétique on a pu déduire deux données capitales : la vitesse des rayons cathodiques, et la charge électrique transportée par un gramme de matière. La vitesse s'est trouvée variable suivant les tubes ; elle a pu varier de 10.000 kilomètres par seconde jusqu'à 200.000 et 250.000 kilomètres, c'est-à-dire jusqu'à des nombres s'approchant de la vitesse de la lumière. Quant à la charge transportée par gramme de matière, elle s'est montrée très sensiblement constante, et indépendante de la nature du gaz enfermé dans le tube ; elle est à peu près de 180 millions de coulombs par gramme, c'est-à-dire à peu près 2.000 fois plus grande que la charge transportée par un gramme d'hydrogène dans l'électrolyse.

Pour rendre compte de ce résultat surprenant, deux hypothèses sont possibles. Ou bien nous avons affaire à des particules matérielles de même masse que l'atome d'hydrogène et deux mille fois plus électrisées. Ou bien nous avons des particules ayant la même charge électrique que l'atome d'hydrogène, et dont la masse est la deux-millième partie de la masse de cet atome. C'est à cette dernière hypothèse, quelque étrange qu'elle ait d'abord paru, que les faits ont donné raison ; et c'est ici que nous pénétrons, si l'on peut parler ainsi, dans le mystère de la constitution de l'atome.

Les corpuscules cathodiques animés, dans un tube de Crookes, de prodigieuses vitesses, viennent d'ordinaire bombarder la paroi de verre ou de métal qu'ils rencontrent. Dans une paroi de verre, ils viennent

s'incruster comme des boulets de canon dans un rempart de terre. Si la paroi est très mince, ils peuvent la traverser et en sortir. C'est ce que Philippe Lenard avait observé avant la découverte de Röntgen ; en fermant un tube de Crookes par une mince fenêtre d'aluminiun d'un centième de millimètre d'épaisseur, il avait fait sortir des corpuscules cathodiques du tube même, et les avait suivis dans leur marche dans l'air ordinaire ou dans le vide absolu. Dans l'air ordinaire, les corpuscules se heurtent aux molécules gazeuses qui forment une masse bien plus dense, et ils ne tardent pas à être ralentis dans leur marche : quelques molécules neutres, jusqu'à près d'une dizaine, peuvent s'agréger autour d'un corpuscule et former avec lui un ion négatif. *Un pareil ion se montre identique aux ions négatifs libérés par les rayons X.*

D'autres expériences très diverses ont montré de même l'identité du corpuscule cathodique et du centre chargé des ions gazeux négatifs. La charge électrique est la même dans les deux cas, elle est toujours un dix-trillionième de microcoulomb.

La charge d'un ion gazeux est donc égale à celle d'un atome d'hydrogène dans l'électrolyse; elle est égale, d'autre part, à celle du corpuscule cathodique. Or, dans le corpuscule cathodique, la charge électrique portée par un gramme de matière est deux mille fois plus grande que la charge portée par un gramme d'hydrogène dans l'électrolyse. Donc le corpuscule cathodique pèse deux mille fois moins que l'atome d'hydrogène.

Tout autre gaz que l'hydrogène, enfermé à très basse pression, dans un tube de Crookes, donne des corpuscules cathodiques identiques aux précédents. Les actions ionisantes : action des rayons Röntgen, action des gaz des flammes, action du phosphore, ont pour effet de produire sur les atomes des corps simples ce que M. Langevin a appelé la *dissociation corpus-*

*culaire* pour la distinguer de la *dissociation électrolytique* dans laquelle la molécule est divisée en atomes entiers.

Cette subdivision de l'atome chimique, — c'est-à-dire de la plus petite portion de matière qui puisse exister avec ses propriétés chimiques, — en fragments beaucoup plus petits, en corpuscules chargés négativement qui graviteraient autour d'un noyau chargé positivement, évoque d'une manière irrésistible le célèbre passage de Pascal dans le fragment sur les deux infinis :

« ...Il pensera peut-être que c'est là l'extrême petitesse de la nature. Je veux lui faire voir là-dedans un abîme nouveau. Je lui veux peindre non seulement l'univers visible, mais l'immensité qu'on peut concevoir de la nature, dans l'enceinte de ce raccourci d'atome. Qu'il y voie une infinité d'univers, dont chacun a son firmament, ses planètes, sa terre, en la même proportion que le monde visible... »

Les expériences sur la compression et la liquéfaction des gaz avaient conduit à se représenter les atomes comme ayant leurs diverses parties à l'intérieur d'une sphère de diamètre très petit, mais déterminé. Ce diamètre de l'atome serait, pour un gaz dans les conditions ordinaires, d'environ un deux-millionième de millimètre. Le corpuscule cathodique, lui, aurait un diamètre environ soixante mille fois plus petit. On peut donc se figurer ces corpuscules au nombre de deux mille, évoluant et gravitant dans l'intérieur d'une sphère de diamètre égal à soixante mille fois leur diamètre propre, sans qu'ils aient chance de se heurter ni de se gêner dans leur mouvement : et l'on en tire cette conséquence importante, que leur énergie de mouvement est simplement proportionnelle à leur nombre.

Sur la nature du centre d'attraction positif qui maintient les corpuscules négatifs, nous n'avons

encore aucune notion : il serait bien intéressant d'instituer des expériences qui puissent projeter quelque lumière sur ce point.

Mais en ce qui concerne le satellite qu'est le corpuscule négatif, nous sommes conduits à une conclusion qui appelle de nouveaux étonnements.

## § 4. — L'INERTIE DE LA MATIÈRE EST-ELLE D'ORIGINE ÉLECTRIQUE ?

Nous voudrions simplement indiquer comment les propriétés de ce dernier fragment d'atome qu'est le corpuscule négatif, posent une question nouvelle : celle de la résolution de la matière elle-même en des éléments qui seraient de l'électricité toute pure.

Une charge électrique en mouvement a les mêmes effets qu'un courant électrique : l'identité des *courants de convection* et des courants ordinaires ou de conduction, admise par Maxwell, par Helmholtz, démontrée par les expériences de Rowland, un instant mise en doute dans ces dernières années, est définitivement établie. Or, un courant électrique crée un champ magnétique autour de lui. Donc une charge en mouvement, un boulet chargé d'électricité négative, emporte avec lui des lignes de force magnétique qui sillonnent l'espace.

Cette charge crée en outre, par le seul fait qu'elle existe, des lignes de force électrique ; si elle se meut, elle les emporte avec elle. La charge qui se déplace dans l'espace emporte donc avec elle un champ de force à la fois électrique et magnétique ; elle laisse dans l'espace, suivant l'expression consacrée et qui fait image, un *sillage électromagnétique*.

Ce sillage ne lui donne aucun effort à traîner, si elle se meut d'un mouvement uniforme. Mais si on passe du repos à une vitesse définie, la création du champ

électromagnétique exige une certaine énergie. Pour donner une vitesse à une charge électrique, ou pour changer la vitesse de cette charge, il faut donc dépenser un travail. Cela revient à dire que la charge électrique toute seule, sans matière, possède une certaine inertie : *l'inertie électromagnétique.*

L'énergie à dépenser pour donner à la charge une certaine vitesse est exactement proportionnelle au carré de cette vitesse, comme c'est le cas pour l'énergie cinétique de la matière. Mais l'énergie augmente plus vite, si la vitesse de l'électricité devient très grande et si elle approche de la vitesse de la lumière. Il faudrait une énergie infinie pour communiquer à une charge électrique une vitesse égale à la vitesse de propagation de la lumière. On peut exprimer le même fait en disant que l'*inertie* de l'électricité ou sa *résistance au changement de vitesse*, est constante pour des vitesses assez faibles, mais augmente avec la vitesse quand celle-ci dépasse quelque dix mille kilomètres à la seconde et deviendrait infinie pour une vitesse à la seconde de 300.000 kilomètres.

Or, des expériences nombreuses sur les corpuscules négatifs que transportent les « rayons cathodiques » et sur des corpuscules pareils émis par les corps radioactifs, conduisent à la conclusion que toute l'inertie de ces corpuscules est de l'inertie électromagnétique due à leur charge électrique, sans aucune addition d'une inertie complémentaire. Donc il n'y a pas de matière ordinaire associée dans ces corpuscules à l'électricité. Et par conséquent, de l'électricité toute seule peut donner lieu à ces effets d'inertie par lesquels on définit d'ordinaire *la masse* ou *la quantité de matière* d'un corps.

Si l'on admet que l'atome matériel se résout en une multitude de ces corpuscules élémentaires qui ne sont que de l'électricité, on ramènerait la matière elle-

même à être « expliquée » par l'électricité, et les propriétés de la matière à des propriétés électriques.

Quelle serait, dans cette manière de voir, la cause de l'attraction entre les électricités contraires? Par quelle inexacte compensation les atomes matériels, composés de charges électriques égales et contraires, exerceraient-ils sur les atomes voisins cette attraction résultante qui constitue l'attraction universelle? Il semble que, plus nous avançons dans l'examen minutieux des dernières particules de la matière et plus nous voyons reculer devant nous l'espoir de comprendre la matière.

Il s'en faut pourtant que la poursuite de ces problèmes soit vaine. Quand la géologie et l'astronomie remontent le cours des âges, elles ne résolvent pas le problème dernier de nos origines. Mais elles reculent dans le passé la date où commence ce que nous savons de notre globe et de nous-mêmes. De même, quand la physique du xx$^{e}$ siècle dissèque, avec des instruments d'une pénétration jusqu'alors inconnue, les molécules et les atomes, elle ne saurait avoir la prétention de faire voir clairement à l'homme « le néant d'où il est tiré » pas plus que « l'infini où il est englouti »; mais « entre ces deux abîmes de l'infini et du néant » il reste un immense espace ouvert à notre curiosité, et dont l'honneur de l'intelligence humaine, aussi bien que l'utilité du genre humain, exigent que nous travaillions à reculer sans cesse les bornes.

Les travaux sur l'ionisation des gaz ne nous apprendront pas les « derniers principes des choses » ; mais ils nous ont apporté déjà, ou du moins nous ont confirmé, deux notions importantes, et qui semblent désormais définitives : celle de la structure atomique des corps matériels, et celle de la prodigieuse complexité de l'atome du corps simple, regardé longtemps comme le dernier degré auquel on pût descendre dans la division de la matière.

### § 5. — RÉACTION DES TRAVAUX RÉCENTS SUR LES THÉORIES ATOMISTIQUES.

De telles conquêtes de *l'atomisme* ont enhardi, à juste titre, les tenants des théories mécanistes. Si la réduction de la matière elle-même à l'électricité constitue, à vrai dire, non plus une variété du mécanisme proprement dit, mais une doctrine différente qu'on pourrait appeler plus correctement *l'électrodynamisme* — comme l'a proposé M. Duhem, — cette doctrine est manifestement proche parente des théories mécanistes. Elle ramène les phénomènes complexes à quelques propriétés simples de particules élémentaires identiques; elle rappelle, pour l'instant, le dynamisme newtonien parce qu'elle n'a pas encore tenté d'explication de la répulsion à distance entre électrons négatifs, mais elle rappelle plus encore une des prétentions, que j'appelle la *prétention essentielle du cartésianisme pur*, en ce qu'elle constitue un effort de réduction du nombre des phénomènes indépendants; réduire la matière à l'électricité n'est pas tout à fait la même chose que réduire l'électricité à la matière, mais ces deux modes d'opérer la réduction de l'une de ces choses à l'autre diffèrent entre eux beaucoup moins qu'ils ne diffèrent d'une doctrine qui les proclame irréductibles.

Mécanisme ou électrodynamisme échappent donc, dès maintenant, à l'une des grosses objections de l'énergétique. Il y a désormais des domaines dans lesquels la fécondité de l'atomisme n'est plus discutable. S'il en est où il n'est pas nécessaire de faire appel à la structure discontinue de la matière et de l'électricité, cela ne prouve rien contre cette discontinuité. Il n'est pas indispensable de l'invoquer dans l'exposition d'un certain nombre de phénomènes : et par cela même que la chose n'est pas

indispensable, elle serait fâcheuse. On peut de même traiter, en acoustique, toute la théorie physique de la musique sans invoquer expressément l'hypothèse que les vibrations sonores consistent en des « mouvements locaux » de points matériels. Si la chimie physique, le plus souvent, n'a pas besoin d'aller plus loin que l'invocation de quelques lois générales, l'œuvre de Gibbs et de ses successeurs ne prouve pas plus contre la discontinuité de la matière, que l'œuvre de Rameau ne fournit d'argument contre l'explication mécanique du son.

Mais en tenant pour accompli le progrès qui résulterait de la fusion, en une idée unique, des idées de matière et d'électricité, il resterait à trancher la grave question de savoir si la mécanique, même généralisée, et transformée en une mécanique électronique dont la mécanique des corps matériels ne serait plus qu'un chapitre, pourrait être assez compréhensive pour rendre compte des phénomènes irréversibles, ou si ces phénomènes restent quelque chose de radicalement irréductible aux *autres*, c'est-à-dire aux phénomènes de mouvements et d'attractions.

La question n'a nullement perdu de son intérêt parce que la conception de la mécanique elle-même a été généralisée. Le conflit du mécanisme et de la thermodynamique garde toute son importance profonde. Est-il insoluble ? est-il au contraire tout près d'être résolu ? c'est là un problème dont les découvertes récentes ont pu détourner un moment l'attention mais qui reste bien, comme je le disais en 1900, l'un des grands problèmes de métaphysique cosmologique de l'heure présente. La belle conférence que fit, en 1905, l'illustre Lorentz à la Société française de physique, est venue prouver à quel point on était bien inspiré en affirmant qu'il n'est pas de question de philosophie scientifique plus actuelle.

# CHAPITRE XXI

## Les systèmes mécanistes et la dégradation de l'énergie.

### § 1. — LA QUESTION DE L'IRRÉVERSIBILITÉ.

Avec le principe de Carnot et l'idée de dégradation d'énergie, s'introduit dans le monde physique la notion de *phénomène irréversible*. Cette notion, la mécanique pure ne nous l'avait pas fournie : tant que nous n'avons que des mouvements de corps matériels, sans qu'il y ait frottement, sans qu'il y ait choc entre corps imparfaitement élastiques, nous pouvons toujours concevoir que ces mouvements s'effectuent en sens inverse ; qu'il suffit d'en changer le sens à un moment donné, pour qu'à partir de ce moment s'intervertissent le passé et l'avenir.

La nature ne nous présente, en toute rigueur, aucun mouvement sans frottement ni choc : mais il est telles circonstances où les conditions précédentes sont réalisées d'une façon suffisante.

Une pierre est abandonnée à elle-même du haut d'une tour : dans sa chute, sa vitesse s'accroît peu à peu ; elle finit par tomber sur le sol. Si, alors, on la prend et qu'on la lance de bas en haut avec la même vitesse qu'elle possédait tout à l'heure dans son mouvement de haut en bas, elle va s'élever en l'air, et remonter au point d'où elle était partie : dans ce

mouvement ascensionnel, la vitesse diminue d'instant en instant : toutes les phases du phénomène de la chute se reproduisent identiques, mais se succédant dans un ordre inverse; rien n'a été changé au mouvement de chute que le sens dans lequel il s'effectue. La chute de la pierre est un phénomène réversible.

On en peut dire autant des mouvements qu'effectuent les astres soumis à des forces de gravitation, de même nature, en définitive, que la pesanteur qui agit sur la pierre. Supposons que, du coup, se trouvent arrêtés le soleil, la terre, la lune, les planètes et leurs satellites; et supposons qu'on leur fasse rebrousser chemin sur leurs trajectoires, en les lançant avec la même vitesse qu'ils avaient au moment de l'arrêt. L'on verrait le système solaire repasser par les états successifs qu'il a parcourus : ni la longueur du jour, ni celle de l'année ne seraient altérées : seul serait changé le sens dans lequel les astres se meuvent sur leurs orbites.

Il en est tout autrement quand de la mécanique pure nous passons à la physique, c'est-à-dire quand nous faisons intervenir les phénomènes calorifiques. Ainsi qu'on l'a vu dans les premiers chapitres, la réversibilité peut exister encore, mais elle devient l'exception.

La fusion de la glace est un phénomène calorifique réversible : si l'on chauffe progressivement de la glace, elle fond à 0°; si l'on refroidit progressivement de l'eau liquide, elle se congèle à 0°, repassant par la même succession d'états physiques que la glace fondante, mais parcourant ces états physiques dans l'ordre inverse.

La propagation de la chaleur par conductibilité est, au contraire, un type de phénomène calorifique irréversible.

Prenons une cuiller chaude à un bout, et froide à l'autre : tous les points se mettent rapidement à une

température uniforme. Sans doute, on pourra rétablir artificiellement une inégalité de température entre deux points de la cuiller; mais, tandis que l'équilibre de température s'établissait de lui-même, il faudra, pour faire cesser cet équilibre, recourir à des moyens détournés; et il arrivera même qu'il soit impossible de faire remonter à la cuiller la série des états calorifiques successifs qu'elle a descendus.

L'exemple suivant est plus usuel. Écartons de la verticale un cordon de sonnette : s'il n'y avait aucun frottement contre le pivot et contre l'air de la salle, ce pendule effectuerait autour de la verticale une série infinie d'oscillations, toutes égales en amplitude. Dans la réalité, il y a toujours frottement, et l'expérience journalière nous apprend que le mouvement de va-et-vient autour de la verticale ne tarde pas à s'amortir : les oscillations deviennent de plus en plus faibles, et il vient un moment où le cordon est de nouveau complètement immobile.

Pendant que notre pendule est en plein mouvement, arrêtons-le à l'un de ses passages par la verticale; il vient du côté droit : lançons-le du côté droit d'où il vient, en lui donnant la vitesse même qu'il possédait quand notre main l'a saisi. Le mouvement nouveau que va prendre notre cordon de sonnette va-t-il être exactement le mouvement précédent, changé de sens? Le pendule va-t-il repasser, dans l'avenir, exactement par la série des positions successives qu'il vient d'occuper dans le passé? Non, assurément : il faudrait, pour qu'il en fût ainsi, que les oscillations devinssent désormais de plus en plus étendues, que l'écart, qui, dans le mouvement primitif, diminuait, augmentât maintenant à chaque battement nouveau. Il est bien évident, au contraire, que, cette fois encore, les oscillations iront toujours s'amortissant, et que les frottements insensibles absorberont et feront passer à l'état de chaleur une part toujours

plus grande de l'énergie communiquée au pendule à l'instant de l'impulsion. La production de chaleur par destruction de mouvement visible, dans les frottements et dans les chocs, est un phénomène qui ne se renverse pas.

Perte de force vive sensible, accompagnée d'un développement de chaleur, comme dans le cas du cordon de sonnette, — nivellement de la température par le passage de la chaleur des parties chaudes aux parties froides, comme dans le cas de la cuiller, — tels sont, en effet, les deux types de *transformations naturelles* qui se produisent constamment d'elles-mêmes dans l'univers, sans être compensées par les transformations inverses équivalentes.

Or, peut-on rendre compte de cette marche constante de l'univers dans un sens, de cette *irréversibilité* du monde, en admettant que la chaleur créée aux dépens du mouvement visible consiste en un mouvement invisible, mais de même espèce que le premier?

Plusieurs savants se sont prononcés pour l'affirmative. Ils en ont tenté même des démonstrations. L'idée essentielle à leurs théories est que, dans un système matériel composé d'un très grand nombre de petits corps solides mobiles, il tend à y avoir égalisation des mouvements par les chocs mutuels; il y a acheminement progressif vers un état final où l'énergie soit également répartie entre les divers genres d'énergie de mouvement. Nous aurons occasion de citer Boltzmann. Mais il s'en faut que cette opinion ait pour elle l'unanimité. En 1893, M. Henri Poincaré a montré l'insuffisance des essais de démonstration de Helmholtz, et a cru pouvoir affirmer, dans la préface de sa *Thermodynamique*, que « le mécanisme est incompatible avec le principe de Carnot ». En 1900, M. Lippmann apportait, à l'appui de la même thèse, un argument ingénieux.

## § 2. — STABILITÉ DU SYSTÈME SOLAIRE ET STABILITÉ D'UN SYSTÈME D'ATOMES.

Un théorème de mécanique céleste, démontré par le même M. Poincaré, permet de donner à cette idée une forme plus visible. L'illustre savant a démontré la *stabilité du système solaire*, en ce sens qu'un ensemble de corps matériels disséminés dans l'espace, et s'attirant en vertu de lois analogues aux lois newtoniennes, doit poursuivre son mouvement sans s'arrêter jamais, et doit se retrouver, au bout d'une période suffisamment longue, dans un état quasi-identique à l'état actuel. Appliquons ce théorème à notre système planétaire : au bout d'un an, la terre a repris sa position première par rapport au soleil ; à ce moment, il est vrai, chacune des planètes avec ses satellites n'a pas retrouvé sa position de l'année précédente. Seulement, on peut être assuré qu'un moment viendra où les corps du système, abandonnés à eux-mêmes et à leur attraction réciproque, se retrouveront dans la position qu'ils ont aujourd'hui même, — ou à peu près dans la même position ; et, qu'à partir de ce moment, leur mouvement recommencera, éternellement le même. La période au bout de laquelle tout se retrouve en l'état est d'autant plus longue que les corps indépendants sont plus nombreux ; mais on peut toujours l'assigner. Le système planétaire, à n'en considérer que la carcasse, ou le squelette, ne s'use pas, ne se dégrade pas : il est stable. Ce qui s'use et se détériore, c'est ce qui en constitue la vie : la chaleur, qui va se disséminant ; les mouvements à la surface des divers astres, lesquels s'arrêtent à la longue ; et la vie organique proprement dite, destinée à s'éteindre sur tous. La marche de notre système solaire vers un état qui sera sa mort n'implique nullement l'*instabilité* du système. La mécanique céleste nous répond de sa sta-

bilité, en même temps que la physique nous affirme qu'il va sans cesse se dégradant.

Rapprochons de ce résultat les données que nous fournissent sur le monde les systèmes mécanistes. Admettons comme vraies, sinon les conclusions du mécanisme sous la forme la plus générale, du moins les conclusions du dynamisme atomistique. L'atomisme, soit sous sa forme ancienne, soit sous la forme électrodynamiste, prétend expliquer tous les phénomènes physiques, calorifiques, lumineux, en regardant tous les corps matériels, et l'éther lui-même, comme formés de petits corpuscules distincts gravitant les uns autour des autres, s'attirant ou se repoussant comme les corps célestes, en vertu de lois non pas identiques, mais analogues aux lois newtoniennes.

Pour les savants qui admettent des systèmes se rattachant plus ou moins étroitement à cette doctrine, le monde physique tout entier, avec sa chaleur, sa lumière, son magnétisme et son électricité, est fait de petits astres groupés en systèmes qui rappellent notre système solaire, mais *notre système solaire réduit à son squelette et à sa carcasse*; l'univers est fait d'innombrables et minuscules systèmes semblables exerçant les uns sur les autres des influences perturbatrices : et les transformations de mouvement dues à ces influences sont, en fin de compte, l'unique ressort de la pièce grandiose qui se joue devant nos yeux.

D'une telle hypothèse va résulter une importante conséquence. Si le monde se réduit, en somme, à de petits astres semblables aux astres de notre système solaire, l'ensemble que constituent ces petits astres doit être stable comme le système solaire lui-même. Sans doute il y aurait quelque témérité à faire une application immédiate du théorème de M. Poincaré à ce système autrement complexe, où les corps en présence sont régis par des lois plus compliquées que les lois de Newton. Il n'en est pas moins

vrai que la loi de stabilité a toute chance d'être applicable à ce système plus complexe, et qu'il n'y aurait, pour l'établir, qu'à généraliser quelque peu une démonstration. Sans avoir recours, d'ailleurs, à des considérations de haute analyse, n'observons-nous pas que, dans l'esprit du grand public, la conception d'un monde d'infiniment petits, bâti sur le plan du monde des astres, implique nécessairement l'idée de perpétuité, et exclut l'idée de dégradation? Il va sans dire que ceci n'est qu'une constatation, et ne saurait être un argument. On aurait donc ce résultat : qu'au bout d'une période suffisamment longue, l'ensemble des atomes, l'ensemble des éléments, — de quelque nom qu'on les appelle — qui forment le monde, auraient repris la position qu'ils occupent aujourd'hui; qu'il y aurait, dans l'avenir, un jour où le monde repasserait par l'état actuel, et que ce jour se reproduirait même, dans l'avenir, un nombre indéfini de fois. Si, au cours des transformations que nous voyons se produire, il y a perte de quelque chose, ce quelque chose est destiné à se retrouver un jour; et nous remonterons au point de départ, d'où nous repartirons pour un nouveau cycle de transformations que rien n'arrête, et qui sont sans fin.

L'existence de phénomènes physiques qui, en eux-mêmes, sont *irréversibles*, la loi de la dégradation de l'énergie, condamnent cette conclusion. Veut-on la regarder comme une conclusion nécessaire du mécanisme, sa condamnation entraîne la condamnation du mécanisme lui-même.

### § 3. — L'HYPOTHÈSE MÉCANISTE PEUT NE PAS ENTRAINER LA STABILITÉ.

Aussi les défenseurs du mécanisme se sont-ils attachés à contester que la stabilité du monde d'atomes auxquels se réduit l'univers physique fût la consé-

quence forcée de l'hypothèse mécaniste. C'est ainsi que M. Couturat a fait observer que la période nécessaire pour que l'ensemble des atomes revînt à son état initial était d'autant plus grande que le nombre des corps était plus grand ; que, par suite, pour un nombre infini d'atomes, la fin de la période n'arrivera pas. Indépendamment de cette remarque, il cite des exemples précis, où, avec un nombre limité de corps célestes ou d'atomes en présence, le monde qu'ils forment marche vers un état-limite, qu'il n'atteint pas, et qu'il pourrait encore moins dépasser pour retourner à l'état actuel. Ce sont là, il est vrai, de ces *circonstances exceptionnelles* que, dans son raisonnement, M. Poincaré avait soin d'exclure ; et, sans qu'on puisse affirmer avec certitude que le monde réel n'est pas dans ce cas, on peut dire tout au moins qu'il y a l'infini à parier contre un, que les conditions qu'il implique ne sont pas réalisées.

M. Lechalas s'est efforcé de montrer qu'on peut imaginer des lois de mouvement des atomes telles que le système échappe aux prises du théorème de M. Poincaré, des lois de mouvement telles que le système ne recommence pas son évolution éternelle. Quelques-uns des exemples qu'il a cités se trouvent seulement des exemples de systèmes qui ne satisfont pas à la loi de la conservation de l'énergie, et que, par suite, on doit écarter. Ce qu'on peut conclure, c'est qu'en tous les cas, la question de savoir si l'on peut imaginer des systèmes d'atomes donnant l'image du monde actuel, du monde physique irréversible, reproduisant à la fois les deux grandes lois de la conservation de l'énergie totale et de la déperdition de l'énergie utilisable, cette question n'est pas, à l'heure présente, résolue par l'affirmative.

Il importe toutefois de prendre garde que le mécanisme, sous sa forme cinétique, le *mécanisme cartésien*, en opposant ce terme à celui d'*atomisme new-*

*tonien*, présente peut-être une plus grande souplesse pour s'adapter à la réalité physique. En n'introduisant aucune force d'attraction et de répulsion autre que celles qui résultent du mouvement même, en s'imposant la condition, en apparence restrictive, de n'avoir comme élément de construction que de la matière inerte et du mouvement, on garde plus de facilité pour mouler étroitement l'image mécanique du monde sur le monde réel lui-même. L'on a précédemment montré comment lord Kelvin s'est efforcé de rendre compte de l'élasticité de la matière en la réduisant à une élasticité dynamique; comment il tente de ramener la résistance à la déformation que présentent les corps solides, à la résistance au déplacement que présente une bicyclette vivement lancée, ou une toupie qui tourne très vite.

Concevons donc un monde physique fait uniquement d'éléments matériels d'espèces différentes, auxquels a été imprimé un mouvement initial; entre ces éléments ne s'exercent que des attractions apparentes provenant du mouvement même : il ne s'agit plus ici de *gravitation* de ces éléments les uns autour des autres, rappelant plus ou moins imparfaitement la gravitation des astres; il y a des mouvements plus ou moins complexes, des mouvements tourbillonnaires et des chocs, dont le résultat est, en fin de compte, d'égaliser les mouvements des diverses particules matérielles, et d'égaliser, dans une certaine mesure, les divers genres de mouvement. Ce simple aperçu suffit pour faire prévoir qu'il n'est pas impossible d'imaginer un pareil système de particules en mouvement, qui donne lieu à des mouvements irréversibles, et qui représente exactement notre monde physique instable : entre elles, une sorte de tassement se produit à la longue, qui rend identiques leurs vitesses, et qui rend uniforme l'état du système.

Et, d'autre part, il semble bien aussi que l'électrodynamisme présente une grande souplesse pour

figurer certains phénomènes irréversibles, et il paraît possible d'emprunter à la théorie que M. Langevin a donnée du magnétisme, une réponse victorieuse à l'argument de M. Lippmann.

### § 4. — LA DÉGRADATION VÉRITÉ DE STATISTIQUE ET LE DÉMON DE MAXWELL.

Cette façon de concilier le mécanisme avec l'irréversibilité du monde implique une conception un peu spéciale de la portée du principe de Carnot. Les physiciens anglais aiment à présenter ce principe comme *une vérité de statistique*, c'est-à-dire comme un principe vrai pour un groupe de particules matérielles, vrai pour un ensemble, vrai, à plus forte raison, pour l'univers, mais comme n'étant plus nécessairement vrai pour les dernières particules de matière ou d'éther, si quelques-unes d'entre elles étaient prises isolément. L'ingénieuse fiction des « démons » de Maxwell a le mérite de montrer comment on peut imaginer qu'il faudrait s'y prendre, pour *tourner* le principe de Carnot.

Prenons une chambre close, pleine d'un gaz à température uniforme : pour le mécaniste, partisan de la théorie cinétique des gaz, cette uniformité de température n'est autre chose que l'uniformité dans la distribution des vitesses des molécules gazeuses, qu'anime un mouvement continuel de va-et-vient. Dans un tout petit espace, assez petit pour renfermer seulement quelques douzaines de molécules, les unes vont un peu plus vite, les autres moins vite; mais la *vitesse moyenne* dans un espace de ces dimensions est toujours la même, en quelque point de la chambre qu'on le suppose placé.

Si nous avions, au début, un côté de la chambre plus chaud que l'autre, la vitesse des molécules serait plus grande au point le plus chaud; elle ne tarderait pas à diminuer au profit des molécules plus lentes, c'est-

à-dire plus froides ; il s'établirait, en fin de compte, un équilibre de température, ce qui entraînerait, ainsi qu'on l'a vu, une déperdition de l'énergie utilisable.

Aucun moyen n'existe de régénérer cette énergie utilisable à moins de l'emprunter au dehors. On ne peut pas faire que, les vitesses moyennes une fois égalisées, il y ait accumulation des molécules qui vont un peut plus vite du même côté, et des molécules qui vont un peu moins vite de l'autre côté : on ne peut pas échauffer une partie d'une masse à température constante avec de la chaleur prise à une autre partie gazeuse qui se refroidit. S'il en pouvait être ainsi, non seulement on éviterait la dégradation d'énergie, mais on régénérerait, aux dépens d'énergie de mauvaise qualité, de l'énergie de qualité supérieure.

C'est ce problème, impossible pour nous, que résoudraient sans peine des êtres intelligents assez petits et assez subtils pour manier des molécules et des atomes comme nous manions des boules de jeux de quilles. Maxwell sépare en deux, par une cloison, cette chambre remplie de gaz tout à la même température; il perce cette cloison de tout petits trous, assez grands pour laisser passer à la fois une molécule unique; il munit chaque trou d'une petite soupape qu'on puisse à volonté ouvrir ou fermer; derrière chacune d'elles, il poste un petit être subtil, un « démon », chargé de veiller sur sa soupape comme un éclusier sur son écluse. Autour de chaque orifice, comme en un point quelconque de la masse gazeuse, il y a mouvement continuel de va-et-vient : il se trouve dans chaque petit groupe de molécules des molécules qui vont plus vite et d'autres moins vite ; tous ces groupes sont identiques entre eux, mais au sein de chacun d'eux règne une certaine diversité. Les démons se garderont de donner eux-mêmes aucune impulsion aux molécules ; ils introduiraient de l'énergie venant de leur propre fonds, ce dont ils

n'ont pas le droit; ils se contentent d'ouvrir et de fermer les soupapes, de façon à laisser passer de droite à gauche celles des molécules qui, dans leur course incessante, vont le plus vite, et de leur barrer le passage quand elles reviennent choquer la paroi pour repasser à droite; ils laissent, au contraire, venir à droite les molécules qui vont moins vite; ces êtres subtils feraient ainsi le triage entre des molécules gazeuses naturellement associées ensemble, et réussiraient, *sans produire aucun travail par eux-mêmes*, à mettre en évidence et à mettre en œuvre les inégalités inévitables au sein d'une masse qui est uniforme pour nos sens grossiers.

Est-il besoin de dire que ces « démons » sont personnages de pure fantaisie? Cette fiction n'en contient pas moins un enseignement profond. Que l'intelligence ait un jour à son service des méthodes assez subtiles pour opérer ce triage entre molécules : ne pourra-t-elle pas arriver à organiser sur une vaste échelle ce travail de sélection dont s'acquittent les démons de Maxwell, et à régénérer, en partie, l'énergie utilisable de l'univers, sans cesse en voie de déperdition?

Et l'on peut justement se demander si les découvertes de Crookes, si les travaux plus récents de Röntgen, ne nous donneront pas, dans une certaine mesure, « prise » sur des éléments de la matière ou de l'éther qui échappaient jusque-là à nos moyens d'étude. Et je ne crois pas absurde d'imaginer que l'on puisse ainsi, dans des conditions et dans une mesure limitées, arriver à tourner la loi de la dégradation de l'énergie[1].

Mais ce qu'on n'arrêtera jamais par aucun examen de la matière au microscope, ni par aucune action individuelle sur quelques atomes isolés, c'est la déperdition générale d'énergie utilisable dans le

1. Ces lignes ont été écrites en 1897. (*La Quinzaine*, t. XIV, p. 193.)

monde, c'est la marche de l'univers, pris dans son ensemble, vers l'uniformité et vers la mort.

Si donc le mécanisme semble peu compatible avec le principe de Carnot, entendu comme une vérité absolue, applicable à un élément quelconque de la matière, c'est peut-être ici le mécanisme qui a raison. Tout ce qu'on lui demande, comme on a le droit de le demander à toute philosophie du monde, c'est de ne pas contredire la loi générale de dégradation de l'énergie universelle, c'est d'être compatible avec le principe de Carnot entendu comme vérité statistique.

Même avec le principe entendu ainsi dans son sens large, le mécanisme peut-il s'accorder? ou bien le désaccord est-il définitif? Sur ce problème, il semble encore prématuré de prononcer un verdict sans appel. Cependant on ne peut nier que, dans les dernières années, la pensée scientifique ne se soit orientée vers l'idée de l'accord.

A l'occasion de l'étude du premier phénomène irréversible, le frottement, on a fait voir, avec M. Brillouin, comment la mécanique pure, ou du moins la physique purement newtonienne, nous fournit des exemples de transformation irréversible d'énergie potentielle en énergie oscillatoire, et comment il suffit, pour réaliser une telle transformation, de traverser des positions d'équilibre instable. L'étude de la diffusion de la matière nous a, par contre, fourni dans le mélange des gaz, un exemple de modification généralement irréversible, qui n'entraîne pourtant aucune dégradation. Ainsi, d'une part, l'idée d'irréversibilité et l'idée de destruction d'énergie utile nous apparaissent comme moins indissolublement liées qu'un premier examen ne l'avait suggéré, ce qui atténue l'impression de brutale antithèse entre deux types de phénomènes : phénomènes mécaniques et réversibles, où rien ne se perd, — phénomènes physiques, irréversibles, où se perd de l'énergie utile.

Et d'autre part, quelque difficulté que rencontre la construction d'un monde physique se dégradant avec des matériaux empruntés au mécanisme, on ne peut plus nier que certaines combinaisons d'éléments purement mécaniques ne puissent fournir des systèmes irréversibles dont l'énergie utile va décroissant. *Il y a donc des mécanismes qui ne contredisent pas les principes de la Thermodynamique.*

### § 5. — LA CONDAMNATION DU MÉCANISME LITTÉRAIRE EXCLUSIF DE L'IDÉE DE DÉGRADATION.

Les partisans du mécanisme sont donc autorisés à dire : « Si la Thermodynamique paraît animée de préventions contre nous, c'est que, trop souvent, on a présenté le mécanisme sous une forme étroite et fausse, contradictoire avec l'idée de dégradation de l'énergie : de ce que certains mécanistes ont compromis le mécanisme, est-ce une raison pour déclarer la guerre à toute espèce de mécanisme? »

Je crois justement que, si nous n'avons pas de raisons convaincantes pour rejeter sans appel toute espèce de mécanisme, il faut rejeter du moins définitivement tout mécanisme contradictoire avec l'idée de la dégradation de l'énergie. Or, on ne peut contester que, dans l'esprit d'un certain nombre de philosophes ou de vulgarisateurs, le *mécanisme littéraire* qu'ils construisaient n'impliquât des conclusions contradictoires au principe de Carnot. Il y a plus. L'erreur de ces systèmes a peut-être été l'une des raisons de leur vogue : sur l'hypothèse mécaniste, comme base, on construisait, comme son couronnement nécessaire, un monde incapable de s'user, ou « rien ne se crée, et rien ne se perd »; un monde reprenant périodiquement la même situation et le même état en toutes ses parties, et se mouvant ainsi dans une oscillation éternelle entre deux états extrêmes. Cela est si vrai

que, même chez certains physiciens qui sont des maîtres en Thermodynamique, — il suffit de se reporter aux citations que nous avons faites de M. Mouret, — cette idée arrive à se superposer aux notions exactes de Thermodynamique, de la façon tout à fait arbitraire et artificielle que nous avons vue.

Peut-être même y a-t-il des vulgarisateurs qui ne tiennent au mécanisme que parce qu'il implique pour eux la durée éternelle du monde physique, parce qu'il entraîne pour eux la conclusion que, dans l'univers, rien ne se détériore qui ne se puisse restaurer de soi-même, et rien ne se détruit que le libre jeu des lois naturelles ne puisse régénérer. Si des philosophes comme M. Couturat ou M. Lechalas sont tout disposés à dégager le mécanisme de toute solidarité avec des conclusions aussi hasardées que compromettantes, j'imagine que, pour certaines personnes, dégagé de ces conclusions, le mécanisme perdrait beaucoup de son prix.

Verdet présentait, dès 1856, un exposé synthétique de « la théorie mécanique de la chaleur ». S'attaquant à la tendance qui a prévalu depuis, et que représentait alors à peu près seul Macquorn Rankine, d'exposer la Thermodynamique indépendamment de toute hypothèse mécaniste, Verdet déclarait qu'il y aurait presque « mauvaise foi » à vouloir exposer les principes de la théorie moderne de la chaleur en les séparant des hypothèses mécanistes qui leur ont incontestablement donné naissance. La critique pouvait porter, s'il était question du principe de la conservation de l'énergie. Ne peut-on dire tout juste le contraire du principe de la dégradation de l'énergie? Aujourd'hui, c'est-à-dire cinquante ans après, nous en sommes encore à chercher un moyen de « concilier » le principe de la dégradation de l'énergie avec le mécanisme : n'y aurait-il pas « mauvaise foi » à nous représenter ce principe comme une conséquence des théories mécanistes?

# CINQUIÈME PARTIE

## LA PORTÉE DU PRINCIPE DE LA DÉGRADATION DE L'ÉNERGIE

---

## CHAPITRE XXII

### La dégradation de l'énergie n'est-elle qu'une probabilité?

---

#### § 1. — IMPOSSIBILITÉ OU IMPROBABILITÉ?

Le magistral ouvrage de Boltzmann : *Leçons sur la théorie des gaz*[1], dont une traduction française a achevé de paraître en 1905, a apporté sur la question du conflit entre la thermodynamique et le mécanisme, et par conséquent sur la portée du principe de la dégradation de l'énergie, des aperçus très intéressants. Sans dissimuler les difficultés que présente, quand on veut entrer dans le détail, — et, suivant le mot de Pascal, voir « de quoi est composée la machine » , — la simple explication mécanique des propriétés thermiques et élastiques des

1. BOLTZMANN, *Leçons sur la théorie des gaz*. Traduction Gallotti et Bénard, Paris, Gauthier-Villars, 1905.

gaz, le livre de Boltzmann laisse la double impression que le mécanisme pourrait bien être le vrai, et que le mécanisme peut se concilier avec l'irréversibilité du monde. Seulement, suivant le mot profond de Gibbs, la marche du monde en sens inverse et l'augmentation de l'énergie utilisable apparaît, dès lors, « non plus comme une impossibilité absolue, mais comme une improbabilité ».

La dégradation de l'énergie, dans un monde où tout se réduit, en dernière analyse, à des mouvements, peut ne plus être une vérité absolue comme la conservation de l'énergie : il suffit d'imaginer qu'à un moment donné on imprime à toutes les particules élémentaires un mouvement inverse de celui qu'elles possèdent pour renverser la marche des phénomènes, *au moins durant les premiers instants*, et pour aboutir à une restauration d'énergie utilisable là où l'on avait une dégradation d'énergie. Donc le phénomène de restauration d'énergie utilisable, même dans un système isolé, n'est pas inconcevable et peut être réalisé. Il n'est plus strictement impossible, il n'est plus que très improbable. Mais il est très intéressant de se rendre compte, dans un cas particulier, du *degré de probabilité* qu'il présente, et c'est précisément ce sur quoi nous renseigne la lecture de Boltzmann.

Nous avons un ballon plein de gaz. Dans la théorie cinétique, c'est une collection de billes élastiques en état continuel d'agitation qui se meuvent chacune en ligne droite jusqu'à ce qu'elles choquent ou la paroi ou une autre bille. La vitesse moyenne des molécules d'azote à la température de zéro degré est d'environ 470 mètres par seconde, et le chemin moyen parcouru par une molécule entre deux chocs est d'un dix-millième de millimètre ; ce qui fait que chaque molécule subit en moyenne 4.700 millions de chocs par seconde. Ces chocs égalisent les

vitesses et les maintiennent toujours autour d'une valeur moyenne, qui caractérise la température. A 20 degrés, la vitesse moyenne des molécules d'azote est plus grande, elle est voisine de 490 mètres. Mettons en communication deux ballons, l'un contenant de l'azote à 0°, l'autre de l'azote à 20°. Les molécules des deux ballons se choqueront et se mêleront; celles qui vont plus vite perdent de leur vitesse aux dépens des plus lentes; et en fin de compte, au lieu d'avoir d'un côté des molécules dont les vitesses oscillent autour de la valeur moyenne 470 mètres. et de l'autre des molécules dont les vitesses oscillent autour de 490, on aura, en chaque point de l'espace occupé par le gaz, des molécules dont les vitesses varient autour de 480, ce qui correspond à une masse gazeuse à 10 degrés.

La transmission de la chaleur d'une partie à l'autre d'une masse gazeuse s'explique ainsi de la façon la plus naturelle dans l'hypothèse cinétique. Le mélange de deux gaz différents s'explique par un processus identique. La marche de particules différentes ou de molécules inégalement agitées n'entraîne dans aucun cas une perte d'énergie : mais la tendance naturelle est manifestement celle qui conduit d'un état hétérogène à l'état homogène.

L'homogénéité, une fois réalisée, persiste indéfiniment. Dans un vase contenant un mélange gazeux : azote et oxygène, ne se produira jamais spontanément un triage conduisant toutes les molécules d'azote d'un côté, celles d'oxygène de l'autre. Dans un vase contenant de l'azote à 10 degrés, ne s'opérera pas davantage un triage spontané amenant d'un côté les molécules ayant des vitesses supérieures à la moyenne et de l'autre les molécules ayant des vitesses inférieures.

Seulement ce triage, que réaliseraient les *démons* de Maxwell, n'apparaît plus impossible à réaliser en

s'y prenant d'une manière suffisamment adroite. Et même le passage spontané de l'homogène à l'hétérogène contre lequel agit sans cesse le brassage des molécules, au lieu d'être absolument impossible, n'est plus que très improbable.

Supposons, pour fixer les idées, que nous soyons partis de deux masses du même gaz à 0° et à 20° : elles se sont mélangées pour donner une masse à 10 degrés. Arrêtons toutes les molécules à l'instant présent, et sans changer leur position, lançons-les toutes à rebours avec la même vitesse. Le système va marcher à contre-courant. Il repassera par les états antérieurs et l'on retournera à l'hétérogénéité.

Observons d'abord que, s'il lui arrive de retourner à l'hétérogénéité, il ne s'y maintiendra pas. Il repassera par cet état, mais reviendra sans retard à l'homogénéité, qu'il conservera. Et, par ailleurs, parmi toutes les distributions possibles que peuvent affecter les positions et les vitesses des diverses molécules, il est *extrêmement peu probable* que se trouve réalisée une distribution susceptible de ramener à l'état hétérogène. Et ce que nous disions du mélange des masses gazeuses à températures diverses, et de leur séparation ultérieure, pourrait être répété sans changement du mélange de deux gaz différents et de leur séparation.

## § 2. — LA PROBABILITÉ DE LA SÉPARATION SPONTANÉE DE DEUX GAZ MÉLANGÉS

Boltzmann a précisément voulu évaluer la probabilité de la séparation spontanée de deux gaz mélangés. Prenons deux gaz d'abord superposés, sans mélange, dans un vase d'un décilitre de capacité : ils se mélangent en quelques instants. Le mélange une fois fait, il faudrait attendre un *nombre de siècles représenté par l'unité suivie de 10 milliards de zéros*

pour avoir quelque chance d'observer entre les deux gaz une séparation partielle.

« On conviendra qu'il revient pratiquement au même de dire que cela ne se produira « jamais », si l'on songe que, durant le même laps de temps, d'après les lois de probabilité, il devrait se trouver plusieurs années pendant lesquelles, par simple coïncidence fortuite, tous les habitants d'une grande ville se suicideraient le même jour, ou bien pendant lesquelles toutes les maisons de la même ville prendraient feu isolément le même jour, également par simple hasard ; cependant, les Compagnies d'assurance, d'accord avec l'expérience, ont raison de ne pas prendre de tels hasards en considération. Si des probabilités aussi faibles, et même d'autres encore beaucoup plus grandes comparées à la précédente, n'étaient pas pratiquement regardées comme identiques à des impossibilités, personne ne pourrait compter sur l'arrivée de la nuit à la fin de la journée, et sur la venue, après la nuit prochaine, d'un autre jour. »

Les deux gaz étant tous deux contenus dans le vase, l'état homogène est donc le plus probable ; l'état de séparation complète est le moins probable. Le monde marche normalement des états les moins probables vers les plus probables : il n'est pas rigoureusement impossible qu'on observe, à un instant précis de la durée et pour une portion limitée de l'espace, une marche inverse, mais là n'est pas le cas général. Et, au total, il y a prédominance de l'état le plus probable, c'est-à-dire, dans le cas particulièrement simple des mélanges de gaz différents ou inégalement chauds, prédominance de l'état de mélange homogène.

Ces nombres éclairent d'un jour singulier les développements auxquels on se livre, comme nous le verrons dans un instant, sur l'*instabilité de l'homogène*.

Voilà deux gaz différents superposés dans un vase d'un décilitre : au bout d'une journée, il est impossible de retrouver une différence; le mélange homogène est absolu. Mais, à partir de ce moment, cet état homogène est stable, à tel point que s'il n'est pas logiquement absurde de supposer qu'une hétérogénéité s'y produise, il faut attendre au moins, pour avoir quelque chance de la constater, je ne dis pas 10 milliards de siècles, — ce qui ne fait qu'un nombre de siècles égal à l'unité suivie de 10 zéros, — mais un nombre de siècles représenté par l'unité suivie de 10 milliards de zéros.

### § 3. — LE SENS DE LA MARCHE DU MONDE MATÉRIEL, D'APRÈS BOLTZMANN.

Rien n'est plus propre à montrer comment l'hypothèse mécaniste, — j'entends l'hypothèse vraiment scientifique — pose la question de la réversibilité. Si tout le monde matériel se résout en particules analogues aux molécules gazeuses, la marche du monde dans le sens où l'énergie utilisable augmenterait n'est plus une impossibilité radicale, mais devient une improbabilité pratiquement équivalente à une impossibilité. Et n'oublions pas que le degré de probabilité du retour à l'hétérogène diminue à mesure qu'augmente le nombre des molécules qui sont en jeu.

Écoutons sur ce sujet Boltzmann, qui est bien obligé de constater la marche du monde dans un sens, mais qui déclare désirable la découverte d'un expédient à tous égards satisfaisant « die Auffindung eines allseitig befriedigenden Ausweges ». pour échapper à la conclusion qui implique la mort du monde matériel :

« La thermodynamique générale est indissolublement liée à l'irréversibilité absolue de tous les phénomènes naturels sans restriction. Elle admet une

fonction (l'entropie[1]), dont la valeur, dans chaque phénomène naturel, ne peut jamais varier que dans un seul sens, à savoir : croître. Chaque état de l'univers diffère donc de tout état antérieur par une valeur de l'entropie sensiblement plus grande. Tous les phénomènes de la nature sont provoqués par l'écart existant entre la valeur actuelle de l'entropie et sa valeur maximum, et cette différence va constamment en décroissant. Malgré l'invariabilité du montant total de l'énergie, son pouvoir de transformation ira donc toujours en diminuant, les phénomènes naturels seront de plus en plus ternes et toute restauration de l'ancienne valeur de l'entropie sera exclue.

« On ne peut pas affirmer qu'une telle conséquence soit en contradiction avec l'expérience, puisqu'elle repose sur nos observations actuelles; mais on avouera qu'il n'est guère satisfaisant de considérer *à priori*, comme absolument nécessaire, l'extension à l'univers tout entier d'une telle conclusion, basée sur l'expérience. La découverte d'un expédient satisfaisant à tous égards, que l'on regarde le temps comme infini ou bien comme formant un anneau fermé, paraît bien désirable.

« En tout cas, nous regarderons plutôt ce caractère irréversible du temps, qui nous est donné par l'expérience, comme une simple apparence due au point de vue particulier et restreint auquel nous nous plaçons... »

« Demandons-nous à présent si l'irréversibilité de la durée révélée par l'expérience pour tous les

1. L'*entropie*, définie comme nous l'avons fait d'après Clausius, — sans vouloir d'ailleurs insister sur cette notion difficile, — est la somme des *valeurs de transformation* qui se sont ajoutées à un système matériel entre un état initial et son état actuel. Il résulte d'autre part de la définition de la valeur de transformation que l'entropie augmente à chaque transformation positive ou naturelle, et que par suite *l'entropie varie dans le même sens que ce que Balfour Stewart appelle la somme des énergies de rebut.*

phénomènes naturels que nous connaissons, est compatible avec la notion d'un univers illimité ; si le caractère de grandeur dirigée avec lequel la suite des temps nous apparaît comme donnée, est compatible avec une suite des temps infinie ou bien avec une suite des temps considérée comme formant un anneau fermé.

« Si l'on veut pouvoir répondre affirmativement, il faut employer, comme image de l'univers, un système dont les variations avec le temps soient données par des équations dans lesquelles la direction positive et la direction négative de la durée jouent le même rôle, et qui permettent pourtant d'expliquer par une hypothèse spéciale l'apparence d'irréversibilité observée pendant de longs espaces de temps.

« On peut se représenter le monde comme un système mécanique composé d'un nombre énorme de particules, et de durée immensément longue, de sorte que les dimensions de notre monde stellaire d'étoiles fixes soient minuscules comparées à l'étendue de l'univers, et que la durée des temps que nous qualifions d'*ères éternelles* (Æonen) soit insignifiante comparée à la durée de l'univers. Dans cet univers, règne presque partout l'équilibre thermique, et, par suite, la mort : mais on y trouve par-ci par-là des domaines relativement petits, de la dimension de notre monde stellaire (nous les appellerons des *mondes individuels*), qui, pendant une durée relativement courte de l'ordre des ères, s'écartent notablement de l'équilibre thermique, ceux pour lesquels la probabilité des états croît étant tout aussi nombreux que ceux pour lesquels elle décroît. Pour l'univers tout entier, les deux directions du temps sont donc impossibles à distinguer, de même que dans l'espace, il n'y a ni dessus, ni dessous. Mais, de même qu'en une région déterminée de la surface de notre planète, nous considérons comme le dessous la direction qui va vers le centre de la terre, de même un être vivant,

dans une phase déterminée du temps et habitant un tel monde individuel, désignera la direction de la durée qui va vers les états les moins probables autrement que la direction contraire : la première sera pour lui le passé ou le commencement, et la seconde l'avenir ou la fin ; et, d'après cette désignation, pour le même petit domaine isolé dans l'univers, on aurait toujours, « au début du temps », un état improbable. Cette méthode me semble la seule qui permette de concevoir le deuxième principe de la thermodynamique, la mort thermique de chaque monde individuel, sans entraîner une modification irréversible de l'univers tout entier depuis un état initial déterminé jusqu'à un état final définitif.

« Le fait que le passage d'un état probable à un état non probable ne s'accomplit pas aussi souvent que le passage inverse, pourrait s'expliquer suffisamment en supposant que l'état initial de l'univers entier qui nous entoure était très peu probable ; cette hypothèse entraîne la conséquence suivante : un système arbitraire de corps qui agissent mutuellement possédera, en général, au début un état non probable. Mais, pourrait-on objecter, le passage d'un état probable à un état qui ne l'est pas devrait bien se produire çà et là et parvenir à l'observation. A cela précisément répondent nos considérations cosmologiques qui viennent d'être esquissées. Les données numériques sur la rareté extrême, inimaginable, du passage d'un état probable à un état moins probable produit dans un espace de dimensions mesurables pendant un temps de durée observable, expliquent qu'un tel passage soit si extraordinairement rare et puisse échapper à toute observation dans ce que nous avons appelé un *monde individuel*, ou plus spécialement dans le nôtre.

« Dans l'univers tout entier, dans l'ensemble de tous les mondes individuels, il existe, en fait, des

phénomènes se succédant dans l'ordre inverse. Mais les êtres qui les observent comptent peut-être aussi le temps en allant des états les moins probables vers les états les plus probables, et l'on ne pourra jamais découvrir s'ils comptent le temps d'une façon inverse de la nôtre, car ils sont séparés de nous dans le temps par des ères éternelles, et dans l'espace par un nombre de fois la distance de Sirius égal à l'unité suivie de 10 milliards de zéros ; et, par-dessus le marché, leur langage n'a aucun rapport avec le nôtre[1]. »

Je n'ai pas résisté à la tentation de citer intégralement ce long passage. Il révèle une préoccupation de ne pas recourir à l'hypothèse d'une création initiale et d'une destruction finale du monde matériel, qui doit désarmer tout soupçon d'arrière-pensées spiritualistes. L'auteur va jusqu'à proposer cette idée, étrange, que le passé et l'avenir pourraient n'avoir d'autre différence objective que de représenter, l'un le côté du temps où les états du monde sont moins probables, l'autre le côté du temps où les états sont plus probables. On ne saurait donc récuser son autorité quand il présente comme d'accord avec la conception mécaniste du monde qu'il a développée la conclusion suivante sur son avenir :

Une fois notre *monde individuel*, composé de tout le monde stellaire que nos instruments nous révèlent, arrivé à l'état de repos et de mort, il y restera. Il y marche. Et quand il y sera parvenu, il s'écoulera des *ères éternelles* avant qu'une circonstance accidentelle se présente qui, à nouveau, le réveille de son repos.

Ce monde lui-même est parti d'un état qui était *très peu probable*, et depuis lors le pouvoir de transformation qui y rend possible le mouvement et la vie, va sans cesse en diminuant, et les phénomènes y deviennent « de plus en plus ternes ».

1. Trad. Gallotti et Bénard, t. II, p. 253.

## CHAPITRE XXIII

## L' « instabilité de l'homogène ».

---

### § 1. — LA LOI DE L'INSTABILITÉ DE L'HOMOGÈNE D'HERBERT SPENCER.

L'idée de la dégradation de l'énergie rencontre devant elle, à vrai dire, non des arguments positifs, mais des habitudes d'esprit. La loi de la dégradation de l'énergie ne contredit point celle de la conservation de l'énergie, ainsi que l'a établi Clausius en 1849, — et c'est là, selon M. H. Poincaré, le principal titre de gloire de Clausius. Libre à quelques ignorants de parler de la contradiction des deux principes, comme si la physique, depuis 1850, n'avait rien appris. La contradiction n'existe pas. Mais une fausse conception de la conservation de l'énergie les rend par avance réfractaires à l'idée de dégradation.

A l'effet produit par l'aphorisme de Lavoisier, qui s'est trop facilement gravé dans toutes les mémoires, à l'impression produite par les admirables pages où Laplace et Fourier célébraient la stabilité du monde, et ensuite par le fameux discours de Helmholtz sur la *conservation de la force* — beaucoup plus connu que la conférence sur les *transformations réciproques des forces naturelles*, dans laquelle, sept ans plus tard, en 1854, il affirmait, après Clausius et Thomson, la dégradation de l'énergie — à toutes ces influences est

venu s'ajouter, dans la seconde moitié du XIX^e siècle, le prestige d'une formule philosophique qui a participé à la fortune du positivisme lui-même : c'est la *loi de l'instabilité de l'homogène*, empruntée par Herbert Spencer au savant russe de Baer, et longuement exposée par lui dans ses *Premiers Principes*[1].

Spencer, cherchant à « embrasser le processus total de la redistribution de la matière et du mouvement, de manière à en saisir d'un coup d'œil les divers résultats nécessaires dans leur lien actuel de dépendance mutuelle », croit avoir trouvé « un moyen de se faire une idée suffisante de l'ensemble de l'opération » en énonçant la proposition que « l'homogénéité est une condition d'équilibre instable ». « L'état d'homogénéité, dit-il, comme celui du bâton posé en équilibre sur son bout inférieur, ne peut se maintenir. »

Et, pour essayer de justifier un aphorisme aussi général et aussi gratuit, Spencer donne des exemples dont les uns sont spécieux, dont quelques autres, il faut le dire, sont tout à fait absurdes.

## § 2. — SPENCER CITE COMME PREMIER EXEMPLE D'INSTABILITÉ UN EXEMPLE TYPIQUE D'ÉQUILIBRE STABLE.

« Parmi les exemples que nous offre la mécanique, dit Spencer, le plus journalier est celui de la balance. Si une balance est bien faite, si elle n'est pas chargée de rouille, si elle n'est pas encrassée, il n'est pas possible de maintenir les plateaux en équilibre parfait : il faut toujours qu'un plateau monte et que l'autre descende, et qu'ils soutiennent une relation hétérogène. »

1. HERBERT SPENCER, *Les premiers principes* (traduction E. Cazelles, Paris, Germer Baillière, 1871), chap. XIX, p. 429. Voir aussi chap. XXII, L'équilibre, p. 519.

Sans vouloir chicaner sur les détails, il n'est pas possible de n'être pas frappé tout d'abord d'une confusion étrange ; si la balance oscille, en effet, autour de l'arête du couteau, cela n'empêche pas l'équilibre d'être stable ; *tout au contraire.* C'est la définition même de la stabilité. Quiconque a étudié la mécanique et la physique sait bien que ce qui caractérise la stabilité de l'équilibre, c'est que de légers écarts sont possibles autour de la position normale de repos, sans que le corps oscillant s'éloigne beaucoup de cette position et sans qu'il cesse d'y revenir. Une balance, il est vrai, peut accidentellement être en équilibre instable : c'est dans le cas où le centre de gravité du système mobile (fléau et plateaux) est au-dessus de l'axe de suspension : en ce cas, la balance est folle ; mais, alors, elle n'oscille point : elle chavire. Si elle n'est pas folle, — et on accordera que c'est le cas, en général, pour les balances dont on se sert, — l'équilibre est stable, comme l'équilibre d'un cordon de sonnette qui pend verticalement et qui, écarté de la verticale, y revient; et contrairement à l'équilibre du bâton reposant sur un de ses bouts, et qui, légèrement écarté de la verticale, tombe, *sans osciller.* Si les plateaux restaient en « équilibre parfait » au sens que donne Spencer à ce mot, c'est qu'il y aurait quelque frottement, ce serait un cas de faux équilibre. L'*homogénéité* n'a rien à voir là-dedans, mais la somme de confusions et d'erreurs accumulées dans ces lignes suffirait à mettre en défiance contre une dissertation d'apparence scientifique qui débute en ces termes, et autoriserait à y opposer une fin de non-recevoir pure et simple, si l'on n'avait la volonté, et je dirais presque le parti pris, de rechercher dans les écrits d'un homme comme Spencer jusqu'à la trace d'une idée juste déformée ou à l'ébauche d'une conception neuve intéressante.

§ 3. — EXEMPLES DE PRODUCTION D'HÉTÉROGÉNÉITÉS.

Poursuivons :

« Prenons un morceau de matière chauffée au rouge; bien qu'il ait au début partout la même chaleur, il cessera promptement d'être également chaud dans toutes ses parties. L'extérieur, se refroidissant plus vite que l'intérieur, n'aura pas la même température que l'intérieur. Le passage à une température hétérogène, que nous voyons si bien dans ce cas extrême, se fait plus ou moins dans tous les cas. »

Ici, l'exemple, sans être parfait, est meilleur. Un morceau de fer rouge, tenu un moment dans un four à température bien uniforme, se refroidit inégalement en ses divers points, quand on l'en retire. D'homogène, la distribution de la température dans ce métal devient hétérogène. Mais cela ne tient nullement à une sorte de nécessité métaphysique : c'est parce que certains points du fer subissent plus directement l'action du milieu extérieur. Et la preuve, c'est qu'il suffit d'attendre un moment. Dans une seconde phase, le refroidissement gagne l'intérieur du métal et le fer ne tarde pas à reprendre dans sa masse entière la température ordinaire. Une fois abandonné à cette température, il y reste tant que la température extérieure elle-même ne varie pas. Dirons-nous que, dans cette seconde phase du refroidissement où les températures s'égalisent entre les divers points de la masse, l'*hétérogène* est *instable*? Ce serait tout aussi légitime.

L'hypothèse de la nébuleuse fournit à Spencer une application nouvelle, et celle-là décidément meilleure, de sa *loi*. Nous avions, à l'origine, une matière éparse. peu dense, distribuée d'une façon qui peut être regardée comme grossièrement homogène. Il est certain que, si on imagine les divers éléments de cette matière

soumis à l'attraction newtonienne, il y aura tendance à la formation de centres distincts autour desquels se concentreront peu à peu toutes les parties de la masse. Le chaos se transformera en un système planétaire. C'est certainement cette illustration de la loi de l'instabilité de l'homogène qui a parfois fait illusion sur la valeur de la *loi*.

Quelle interprétation pouvons-nous donner de cet accord? simplement celle-ci : qu'il arrive, en effet, que l'homogénéité puisse être un état d'équilibre instable : *c'est ce qui aura lieu quand la différenciation correspondra à une dégradation d'énergie*. Il arrive souvent, au contraire, que l'homogénéité constitue l'état d'équilibre stable ; c'est ce qui a lieu quand la production d'une hétérogénéité ne pourrait se faire que par une restauration d'énergie de qualité supérieure. En ce cas, toute hétérogénéité, qui vient accidentellement à se produire, tend à s'atténuer jusqu'à ce que l'équilibre homogène soit rétabli.

Spencer cite encore la formation d'une croûte à la surface du globe incandescent, et la solidification de la surface du globe lui offre « un cas des plus importants et des plus simples du passage d'un état uniforme à un état multiforme ». Ce cas est le même que celui du morceau de métal chauffé au rouge et abandonné ensuite au refroidissement. Et la cause de différenciation est ici, encore, dans les conditions extérieures ; elle n'est pas intrinsèque. La surface du corps chaud est exposée au refroidissement dans des conditions différentes de la masse intérieure. Quoi d'étonnant à ce que la loi de refroidissement de la surface soit différente de la loi de refroidissement de l'intérieur, bien que le point de départ et le point d'arrivée soient les mêmes pour l'intérieur et pour la surface?

Le cas d'une matière homogène dont les diverses particules s'attirent, nous présente, au contraire, un

exemple de réelle instabilité. Imaginons une molécule située entre deux amas égaux de matière qui l'attirent à droite et à gauche.

Le moindre écart de la molécule, à partir de la position initiale, augmente l'attraction qu'exerce l'amas dont elle s'est rapprochée et diminue l'attraction de l'autre; cet écart, dans quelque sens qu'il se soit produit, s'exagérera, et la molécule viendra tomber sur l'un ou l'autre des deux amas. Là, il y a instabilité véritable. En effet, la chute de la molécule sur l'un des amas de matière entraîne transformation en chaleur d'énergie mécanique d'attraction, c'est-à-dire dégradation d'énergie.

Mais quel est l'état final réservé à un tel système ? C'est un état homogène comme le premier, quoique différent du premier. La nébuleuse primitive finira par se concentrer en un globe unique, qui nous présentera une matière agglomérée au lieu d'être disséminée, mais où la plus grande partie de l'énergie aura passé à l'état d'énergie calorifique uniformément répartie. L'énergie mécanique initiale se sera dégradée : mais *son passage de son état homogène initial à son état homogène final se sera fait par une succession d'états hétérogènes.*

Une comparaison, qui ne prétend nullement à être une explication, fera mieux comprendre notre pensée. Nous l'empruntons à la géographie physique.

Imaginons un plateau de quelques centaines de mètres d'altitude, qui domine une plaine basse d'où le sépare une paroi abrupte. A la longue, quelque dure que soit la roche qui forme le plateau, les eaux courantes y pratiqueront leur travail d'érosion et creuseront, par le mode d'action que nous avons longuement décrit, des vallées qui conduiront, par une pente ménagée, les eaux tombées sur le plateau jusqu'à la plaine inférieure. Qu'on suppose, au début, le plateau par-

faitement horizontal et régulier. Des circonstances accidentelles détermineront, sans qu'on puisse l'assigner d'avance, le point où se creusera, dans ce terrain bien uni, la première rigole qui sera le commencement de la première vallée. Un premier lit de torrent ébauché, c'est là que les eaux agiront le plus ; là, où le creusement a commencé, il se poursuivra. Ici, tout écart à l'uniformité primitive des terrains tend à s'exagérer. Cette uniformité est instable. Et l'œuvre d'érosion, se poursuivant, accusera les différences, rendra chaque jour plus creuses les vallées creuses, façonnera un terrain primitivement uni en un terrain accidenté, où des pentes se dessinent, où des lits de rivières se forment, où des cascades jaillissent. Et la partie la plus pittoresque du paysage, entre la plaine, où la rivière coule tranquille, et le haut plateau où serpente le ruisseau sur une pente à peine indiquée, est dans cette partie moyenne de la vallée où tout est *inégalité*, et où l'existence d'une inégalité est pour la nature l'occasion de créer sans cesse une inégalité nouvelle.

Mais laissons l'œuvre d'érosion se poursuivre sans relâche. Il adviendra que le plateau tout entier sera progressivement attaqué, que toute la terre dont il est formé, arrachée par l'eau des torrents, descendra dans la plaine inférieure dont elle élèvera le niveau, et qu'en fin de compte nous aurons une configuration de terrain d'où le plateau lui-même aura disparu. Après avoir commencé par créer des accidents de terrain dans un terrain plat, l'érosion finira par niveler ces accidents. C'est d'abord l'uniformité de niveau qui était instable : ce sont ensuite les accidents eux-mêmes qui le deviennent. Mais il y a un caractère commun à ces divers stades du travail des eaux courantes : c'est que partout elles entraînent la roche et la terre vers le bas. Et quand tout le plateau est descendu dans la plaine, il y a quelque chose qui est

perdu sans retour. On a de nouveau un état homogène, mais différent du premier, et correspondant à une moindre énergie potentielle que le premier.

Le passage d'un état homogène à un autre état homogène, plus stable que le premier, s'est fait, seulement, par l'intermédiaire d'un état hétérogène.

## § 4. — LE RETOUR A L'HOMOGÈNE.

Laissons de côté tout ce que Spencer dit du monde vivant, qui sortirait de notre sujet; laissons aussi de côté la démonstration *à priori* de l'instabilité de l'homogène comme corollaire de la persistance de la force, où j'avoue ne pas voir autre chose qu'une jonglerie de mots à l'usage des personnes qui ont une vague teinture de science, sans culture scientifique solide, et abordons le chapitre où Spencer apporte une restriction essentielle à ce qu'il vient de donner comme une loi générale :

« Vers quel but tendent les changements que nous avons étudiés? Marcheront-ils toujours sans s'arrêter? Ou bien prendront-ils fin? Les choses peuvent-elles devenir de plus en plus hétérogènes tant que durera l'avenir? Ou bien existe-t-il un degré que l'intégration de la matière et du mouvement ne peut dépasser? Est-il possible que cette métamorphose universelle suive le même cours indéfiniment?

« Ou bien travaille-t-elle à produire un état définitif qui n'est pas susceptible de subir une modification nouvelle ? *C'est à cette dernière conclusion que nous sommes inévitablement conduits...* »

« Les redistributions de matière qui se font autour de nous, aboutissent toujours à une fin par la *dissipation* du mouvement qui les opère... »

« Il nous paraît évident que le frottement causé par les marées est une cause réelle du décroissement

de la rotation. Si lente que soit l'action, nous devons y voir un exemple nouveau du progrès universel vers l'équilibre. »

Et Spencer cite, d'après une traduction de Tyndall, la conférence de Helmholtz, « Ueber die Wechselwirkung der Naturkräfte ». Tous ces passages, sans qu'elle soit exprimée explicitement, sont manifestement inspirés de l'idée de la dégradation de l'énergie.

« Qu'un état de mort universelle soit la limite de l'opération qui s'effectue partout, cela semble hors de doute. Une opération ultérieure viendra-t-elle retourner ces changements et inaugurer une vie nouvelle? C'est une question que nous examinerons plus tard. Pour le moment, il suffit que la fin prochaine de toutes les transformations que nous avons décrites, soit un état de repos. »

La question, du moins, est bien posée. Par la suite, Spencer indiquera ses préférences pour l'hypothèse d'un rythme imprimé à tous les changements de l'univers, et « imprimé aussi à la totalité de ces changements », c'est-à-dire produisant « tantôt une période immense, durant laquelle les forces attractives prédominent et causent une concentration universelle, tantôt une période immense durant laquelle les forces répulsives prédominent et causent une dissolution universelle »; des ères alternantes de rénovatation et de dissolution.

### § 5. — LES DEUX PHASES DE PRODUCTION ET DE DESTRUCTION D'HÉTÉROGÉNÉITÉS COMPORTENT TOUTES DEUX UNE DÉGRADATION D'ÉNERGIE.

Cette conception, d'ailleurs entièrement gratuite, s'accorde assez bien avec les idées qu'ont formulées depuis lors divers physiciens, tels que Boltzmann.

Ce qu'il convient de reprocher à Spencer, ce n'est donc pas de n'avoir rien dit du principe de la dégra-

dation dont il a confusément senti l'importance, c'est, d'abord, de n'avoir pas vu que lorsqu'une transformation naturelle présente ces deux phases successives, qu'il s'est plu à décrire, de différenciation et de retour à l'homogénéité, *les deux phases comportent l'une et l'autre une dégradation d'énergie*, et que c'est le caractère vraiment commun à tous les phénomènes naturels ; c'est ensuite d'avoir donné à la différenciation des propriétés, dans un milieu homogène, un rôle et une généralité qu'elle n'a pas dans la nature, et d'avoir, sinon inventé, du moins lancé dans la circulation, une de ces formules d'apparence scientifique, qui n'ont rien d'une loi et qui font figure de loi ; et la sienne a si bien accaparé l'attention des lecteurs que ceux-ci n'ont pas aperçu dans son œuvre, derrière l'invocation de la « permanence de la force », l'hommage réel, quoique insuffisamment précis, rendu à la loi de dégradation.

L'aphorisme de l'instabilité de l'homogène doit être remplacé par cette proposition :

L'homogène est instable quand la différenciation est accompagnée d'une dégradation d'énergie.

L'homogène est stable et aucune différenciation ne se produit, lorsque cette différenciation comporterait une restauration d'énergie utilisable.

Un état hétérogène est toujours instable. Un état homogène peut être moins stable qu'un autre état homogène : en ce cas le passage du premier état homogène au second peut se faire par une succession d'états hétérogènes. Les deux phases de la transformation totale : passage du premier état homogène à un état hétérogène, et passage de cet état hétérogène au second état homogène, sont toutes deux des phases dans lesquelles il y a dégradation d'énergie.

# CHAPITRE XXIV

## Les tentatives d'extension du principe à l'univers.

---

### § 1. — L'ÉNONCÉ DE CLAUSIUS.

Aussitôt après la « découverte » de Clausius, donnant du « principe de Carnot » un énoncé qui ne contredisait plus le principe de la conservation de l'énergie, plusieurs physiciens et philosophes, au premier rang desquels il convient de citer Clausius lui-même, ne résistèrent pas à la tentation de chercher quelles conséquences on peut tirer de ce principe sur le passé ou sur l'avenir du monde matériel.

Leurs spéculations n'ont pas toujours été heureuses : sans doute, si l'on veut aborder les problèmes de cosmologie tel que celui de l'éternité de l'univers, on ne saurait faire abstraction des résultats de la science positive : mais en présentant certaines conclusions métaphysiques comme des conséquences nécessaires de principes physiques, on risque de rendre ces principes solidaires d'une philosophie déterminée et de les exposer à des objections nouvelles.

Le livre de M. Armand Sabatier, *la Philosophie de l'Effort*, est venu rappeler récemment de quel intérêt était la considération du principe de la dégradation de l'énergie dans la discussion du problème de la durée de l'univers. Dans un court et intéressant article, intitulé « Réflexions sur l'univers et les lois natu-

relles », M. Pellat a montré que ce principe établit un lien logique entre les deux problèmes connexes, mais pourtant différents, de l'infinité et de l'éternité de l'univers. Mais ces savants ne formulent que des conclusions prudentes, et n'énoncent aucun de ces aphorismes qui, répétés sans discernement, donnent aisément prise à des critiques justifiées.

Clausius, à l'origine, avait été moins prudent. A l'affirmation des philosophes qui avaient essayé de traduire le principe de l'équivalence en disant que « l'énergie de l'univers demeure invariable », il avait juxtaposé cette autre affirmation destinée à traduire le second principe : « L'entropie de l'univers va constamment en augmentant. »

En un sens, cette seconde proposition n'est ni plus ni moins légitime que la première. Mais en un autre sens, elle soulève une difficulté à laquelle la première ne se heurte pas. Elle parle de l' « entropie de l'univers ». A supposer que l'univers ait une « énergie » déterminée et susceptible d'être définie, il ne s'ensuivrait pas qu'il eût une « entropie » définie. Le concept « prodigieusement abstrait » de l'entropie, ne correspond à une réalité facile à définir sans objection que dans le cas de systèmes où ne se passent que des phénomènes réversibles. Dans un système matériel où ont lieu des phénomènes quelconques, et justement des phénomènes qui comportent dégradation d'énergie, plusieurs physiciens ont soutenu qu'il est impossible de définir l'entropie. Tous, à vrai dire, ne se sont pas montrés aussi rigoureux, puisque nous avons vu Boltzmann lui-même reprendre la formule de Clausius, et dire que « l'entropie de l'univers ne peut varier que dans un sens, à savoir : croître ». Néanmoins la formule a le grand inconvénient de soulever des difficultés sérieuses, de ne pas présenter une signification aisément accessible, et il faut absolument l'abandonner.

Il faut l'abandonner avec d'autant moins de regret que les objections à la formule de Clausius ont servi de prétexte aux critiques adressées au principe de la dégradation lui-même. Le lecteur peut répéter l'expérience que j'ai faite maintes fois. Discutant sur le sens dans lequel se font toujours les transformations d'énergie, j'essayais d'appeler l'attention sur la dégradation qui en résulte; je reprenais la phrase de Balfour Stewart : « Qui peut assurer qu'il n'arrivera pas un temps où nous aurons pratiquement conscience de l'accroissement de l'énergie de rebut de l'univers? » et j'indiquais que cette époque à laquelle l' « usure » de notre monde nous sera perceptible, est bien arrivée, — puisque, par exemple, nous avons laissé arracher le tapis végétal des pentes de nos montagnes avec une indifférence coupable, faite de la conviction erronée que, dans la nature, « rien ne se perd ». Mon interlocuteur, s'il avait quelques notions scientifiques, contestait aussitôt la légitimité de ces considérations, et déclarait invariablement qu'il n'est pas sûr que « l'entropie de l'univers aille en croissant »; — d'abord parce que nous ne savons pas si l'univers est limité, — ensuite parce que nous ne savons pas ce que c'est que son *entropie*. Encore une fois, quand je montre tous les phénomènes naturels entraînant des transformations de l'énergie qui se font dans le même sens, je ne parle pas « d'entropie de l'univers ». Mais il suffit qu'on en ait une fois parlé, pour que les critiques méritées par cette locution servent éternellement de fin de non-recevoir à ceux qui dénient toute portée au principe de la dégradation de l'énergie.

La portée de ce principe consiste en ce qu'il permet une critique des conséquences ou excessives ou erronées qu'inspire la considération exclusive du principe de conservation. S'il n'autorise pas des conclusions métaphysiques positives, il y a d'autres conclusions qu'il autorise à rejeter. C'est en ce sens et avec

ces réserves que nous abordons, en ce bref chapitre, la question de l'extension du principe de la dégradation de l'énergie à l'ensemble de l'univers matériel.

## § 2. — L'HYPOTHÈSE DE LA RECONCENTRATION.

La loi de dégradation que nous observons dans tous les phénomènes qui se passent sous nos yeux, est-elle susceptible d'être étendue à l'univers tout entier?

Contre cette extension se présente une grave objection. Qui nous garantit que l'univers matériel soit un système limité? Et, s'il ne l'est pas, que signifient ces expressions : l'*énergie totale* de l'univers? ou l'*énergie utilisable* de l'univers? Dire que l'énergie totale se conserve, mais que l'énergie utilisable diminue, n'est-ce pas formuler des propositions vides de sens?

Assurément. L'assimilation du monde matériel tout entier à un système limité et soustrait à toute influence extérieure à lui, reste une hypothèse; et j'ajoute une hypothèse qui se heurte, comme l'hypothèse inverse, à de sérieuses difficultés. Nous concevons très bien une matière limitée, un nombre d'étoiles fini; mais le milieu qui remplit le vide interplanétaire, le milieu qui permet la transmission des ondes électriques et lumineuses, et qu'on appelle l'éther, forme-t-il une sphère de rayon limité? Existe-t-il, au delà, un espace vide d'éther? Et comment concevoir la surface de séparation de ce vide absolu, et de l'éther? Sur cette surface, y a-t-il réflexion de la chaleur et de la lumière émanées des points intérieurs à l'éther, et *reconcentration* des rayons en d'autres foyers, comme le pensait Rankine?

Cette hypothèse de la reconcentration des rayons lumineux et de la reformation de soleils incandes-

cents à partir de soleils éteints ne résiste pas d'ailleurs à un examen approfondi.

Clausius et Verdet ont fait à Rankine une réponse sans réplique. S'il est possible qu'une raison ou une autre réunisse, en un foyer, des rayons partis d'un point de l'espace, ce foyer sera l'image du point d'où les rayons sont partis ; ce qui est certain, c'est que jamais le foyer ne pourra être porté à une température supérieure à celle du point dont il est l'image. Tous les physiciens qui ont pratiqué l'optique connaissent par expérience une propriété des rayons lumineux, rarement indiquée dans les livres ; en dépit des idées fausses suggérées par les ouvrages élémentaires sur la « concentration » ou la « recombinaison » des rayons lumineux, on n'arrive jamais, par aucun système de lentilles ou de miroirs, à faire que l'*éclat* d'une image soit supérieure à l'éclat de l'objet lui-même. Etant donnée une source de lumière, comme un arc électrique, qui émet un certain nombre de bougies par centimètre carré, on n'arrive jamais, par aucune concentration, à obtenir de cet arc une image plus *éclatante*, — c'est-à-dire émettant plus de lumière par unité de surface — que l'arc lui-même.

Des considérations d'optique géométrique permettraient de démontrer ce résultat, sans recourir au principe de Carnot, dont il est une application. Si un soleil s'est refroidi, ce n'est donc pas le foyer formé par sès propres rayons qui pourra jamais le réchauffer.

La chaleur solaire ne saurait, en aucun cas, être due à des combinaisons et à des rencontres de rayons calorifiques empruntés à des corps plus froids. Elle ne peut provenir que de deux origines : ou chaleur reçue d'un autre soleil plus chaud, ou destruction d'énergie mécanique transformée en chaleur; dans l'un et l'autre cas, il y a dégradation, toujours. Le second cas est celui que réalise notre soleil : les matériaux qui en forment la surface se rapprochent

sans cesse du centre; ils tombent vers un centre doué d'un énorme pouvoir attractif, et, comme il arrive quand, sur notre terre, un corps qui tombe vient frapper le sol, il y a toujours destruction d'énergie mécanique et gain d'énergie calorifique. De même encore, si une comète ou une planète vient heurter le soleil, cette chute peut entretenir la chaleur solaire pour quelque temps, quelques jours ou quelques années, suivant la masse du corps tombé. En tous les cas, et quelle que soit l'hypothèse faite pour expliquer la formation première de notre système planétaire, la genèse d'un soleil aussi bien que son extinction est accompagnée, invariablement et inéluctablement, d'une dégradation d'énergie, d'une perte d'énergie utilisable.

## § 3. — ON EST MOINS FONDÉ A PARLER DE LA CONSERVATION DE L'ÉNERGIE DE L'UNIVERS QUE DE SA DÉGRADATION.

Il faut admirer, en tous les cas, comment les difficultés relatives au caractère, fini ou infini, de l'espace, et du monde matériel, n'arrêtent pas ceux qui proclament, sans hésitation et sans réserve, la conservation de l'énergie dans l'univers; et comment il se trouve des personnes pour affirmer en même temps que le monde est infini et que la conservation de son énergie nous garantit sa permanence.

Il ne faut pas se lasser de le redire. Si l'on admet que le premier principe de la thermodynamique, la conservation de l'énergie, est applicable à l'ensemble de l'univers, on ne saurait se refuser à admettre que le second principe, la dégradation de l'énergie, lui est également applicable.

Il y a plus. Abandonnons tout raisonnement qui porte sur l'univers entier, ce qui nous dispense de nous demander s'il est fini ou infini. Prenons un système limité, tel notre système solaire. Il n'est plus

un système isolé, soustrait à toute influence extérieure. Notre système solaire reçoit un peu de lumière et aussi une quantité insignifiante de chaleur des étoiles qui lui sont étrangères : par contre, notre soleil rayonne au delà des limites de son cortège de planètes une quantité d'énergie calorifique et lumineuse qui est loin d'être négligeable, ce qui constitue, pour le système solaire, une perte sèche. Cette chaleur solaire, qui se perd ainsi dans l'espace, est elle-même entretenue aux dépens de l'énergie potentielle de gravitation que représente la matière cosmique en voie continue de concentration vers le soleil. Notre système solaire lui-même peut être entraîné dans l'espace vers quelque constellation qui l'attire ; mais si on laisse de côté l'énergie qui peut résulter de cette attraction mutuelle, pour n'avoir égard qu'à l'énergie intérieure propre au système solaire, on peut affirmer qu'en ce système matériel, l'énergie intérieure totale diminue de jour en jour, et d'année en année : l'énergie totale ne se conserve pas.

Et cela n'empêche pas que l'énergie du système solaire, qui va diminuant en *quantité*, — qui, au sens propre du mot, se *perd*, — ne diminue en même temps en *qualité* et ne se *dégrade*. Quand la matière de la nébuleuse initiale qui reste encore éparse et diffuse achève sa concentration et vient tomber sur le soleil, l'énergie mécanique de la chute est transformée en chaleur : première dégradation d'énergie ; — quand la chaleur solaire est ensuite rayonnée sur les planètes refroidies, en ce passage de chaleur d'un foyer chaud sur les corps froids : deuxième dégradation. Et sur notre terre même, où presque toute l'énergie dont nous disposons a pour origine le rayonnement solaire, nous voyons cette énergie se dégrader en se transformant : l'intervention des êtres vivants, des végétaux surtout, peut avoir pour résultat de ralentir la dégradation, jamais de la supprimer.

Non seulement donc ceux qui affirment la conservation de l'énergie dans l'univers entier ne sauraient se refuser à souscrire à l'idée de dégradation de l'énergie dans ce même univers; mais, au contraire, il ne serait pas absurde d'imaginer un univers où, à l'exemple de notre système solaire, l'énergie intérieure totale irait diminuant, en même temps que la fraction conservée passerait progressivement sous forme inutilisable, où l'énergie se *perdrait* et se *dégraderait* tout à la fois. On n'a pas le droit d'admettre le premier principe appliqué à l'univers entier et de rejeter le second. On serait en droit, sans tomber dans aucune contradiction, d'admettre le second et de rejeter le premier.

Et, laissant de côté ces formules d'*énergie totale* ou d'*entropie de l'univers*, dont se servait Clausius, on ne peut s'inscrire en faux contre les conclusions, exprimées sous une forme plus modeste et plus prudente, du mémoire primitif de Thomson, et dont nous rappelons ici la première et la dernière :

« 1. — Il y a actuellement, dans le monde matériel, une tendance universelle à la dissipation de l'énergie mécanique.

« 3. — La terre doit avoir été dans le passé, à une époque séparée de nous par un temps fini, et sera dans l'avenir, à une époque séparée de nous par un temps fini, impropre à l'habitation de l'homme tel qu'il est constitué à présent, à moins que des opérations n'aient eu lieu, ou ne soient destinées à être accomplies, qui sont impossibles sous l'empire des lois auxquelles sont soumises les opérations connues qui ont lieu actuellement dans le monde matériel. »

### § 4. — LE SENS DE LA VARIATION DE L'ÉNERGIE UTILE A-T-IL PU CHANGER?

La dernière restriction n'enlève-t-elle pas tout son intérêt à la conclusion de Thomson? Car enfin, si tous

les phénomènes auxquels nous assistons aujourd'hui nous révèlent une marche du monde dans une voie déterminée, et la prédominance d'un sens des transformations de l'énergie sur le sens opposé, qui nous garantit que ce qui est vrai aujourd'hui l'était hier et le sera demain? Et, dès lors, si nous essayons de plonger nos regards trop loin dans le passé ou dans l'avenir, nous n'avons plus de lumière qui nous permette de percer l'obscurité de ces ténèbres.

On pourrait répondre que ce raisonnement est à tout le moins interdit à ceux qui invoquent sans aucune réserve la « constance des lois naturelles », et que, s'il prouve quelque chose contre le second principe de la thermodynamique, il est aussi probant contre le premier. Si actuellement l'énergie totale nous paraît se conserver, qui nous dit qu'il en a toujours été de même et qu'il en sera toujours ainsi?

La réponse serait insuffisante. L'argument invoqué porte beaucoup plus contre une loi qui se traduit par une inégalité, que contre une loi qui se traduit par une égalité. Voilà une grandeur qui nous apparaît aujourd'hui comme invariable; en voici une autre qui diminue : admettre que la première ait pu être variable est plus difficile que d'admettre que la seconde ait pu varier en sens inverse et augmenter. Supposer qu'un objet mobile ait pu se mouvoir en sens inverse de son mouvement actuel, est plus aisé que de supposer qu'un objet immobile ait pu se mouvoir. Donc il n'y a pas d'inconséquence à imaginer que, la conservation de l'énergie totale n'ayant jamais été en défaut, la période actuelle de dégradation ait été précédée et puisse être suivie de périodes où l'énergie utilisable augmente au lieu de diminuer.

Logiquement, l'hypothèse n'a rien d'absurde. Si, pourtant, au lieu de raisonner dans l'abstrait, on essaie de se représenter sous forme concrète ce qui

aurait pu se passer dans ces périodes de restauration des formes supérieures de l'énergie, on se reconnaît impuissant à citer, ou seulement à imaginer, un phénomène qui n'entraîne pas dégradation d'énergie. Conçoit-on une cuiller d'argent, tout entière à la température ordinaire, et maintenue dans un écrin à cette même température, qui, tout d'un coup, s'échaufferait à un bout et se refroidirait à l'autre? Conçoit-on un cordon de sonnette immobile dans la verticale qui, sans la moindre impulsion, se mettrait à osciller de part et d'autre, en faisant des oscillations croissantes, et qui emprunterait cette énergie de mouvement à la chaleur ambiante? Personne ne conçoit davantage, dans le passé le plus reculé, ou dans l'avenir le plus lointain, un phénomène astronomique ou géologique qui, au lieu d'entraîner une dégradation d'énergie, correspondrait à une restauration d'énergie utilisable. Le *cycle géologique* constitué par une succession de phénomènes qui ramènent une région, après des soulèvements, suivis d'érosion, à son état primitif, n'est qu'en apparence un *cycle fermé* au sens physique du mot. Il est composé de phénomènes qui, tous, comportent une dégradation d'énergie; et, à la fin du cycle, l'énergie libre en réserve dans notre globe a diminué : quelque chose s'est usé et s'est perdu sans retour.

Phénomènes lents ou rapides, dépôts de sédiments ou éruptions volcaniques, aussi bien que formation d'une planète, extinction d'un soleil ou chocs de deux astres, personne n'imagine qu'ils puissent avoir lieu s'ils ne correspondaient à une transformation en énergie calorifique d'énergie supérieure, mécanique ou chimique, ou à un passage de chaleur de corps plus chauds sur de plus froids. Habitudes d'esprit, dira-t-on, et qui sont inspirées par le spectacle des phénomènes que nous avons sous les yeux. Il n'en est pas moins intéressant de constater que personne

n'imagine un phénomène géologique ou astronomique qui n'entraînerait pas une dégradation d'énergie; par suite, la période hypothétique où il y aurait pu avoir accroissement d'énergie utilisable dans l'univers serait tout au moins à rejeter dans le passé, de l'aveu unanime, par delà toutes les époques de formation de la terre ou même de formation du système solaire, jusqu'à cette « période atomique » ou cette « période moléculaire » dont parlait Renan, où se seraient constituées les molécules « qui pourraient bien être, comme toute chose, le fruit du temps, le résultat d'un phénomène très prolongé, d'une agglutination prolongée pendant des milliards de milliards de siècles[1] ».

Les raisonnements des savants les plus divers sur le passé du monde impliquent ainsi un résultat essentiel, et, sinon incontestable, tout au moins incontesté : c'est que, depuis la première ébauche d'un système planétaire s'esquissant dans la nébuleuse primitive, la dégradation de l'énergie s'est poursuivie inéluctable. La citation que nous avons faite de Boltzmann autorise à dire qu'il n'est pas contesté davantage qu'elle doive se poursuivre dans l'avenir, durant une période du même ordre de longueur, et largement suffisante pour permettre à notre soleil de s'éteindre et à toute vie de s'évanouir de notre système solaire.

Dans un article nécrologique sur lord Kelvin, M. H. Poincaré remarquait que les conclusions générales de ce savant sur l'avenir du système solaire, ne sont nullement infirmées par l'hypothèse de l'emprunt d'une grande partie des énergies de l'univers à des matériaux radioactifs. Tout au plus a-t-on l'espérance de « prolonger un peu le malade »; mais il n'en est pas moins condamné.

1. Renan. *Dialogues et fragments philosophiques,* p. 171.

# CHAPITRE XXV

## La dégradation de l'énergie devant la critique des sciences.

### § 1. — LA NOTION MODERNE DE LA « LOI » ET DU « FAIT » SCIENTIFIQUE.

Parmi les considérations que l'on peut faire valoir pour limiter la portée du principe de la dégradation de l'énergie, il en est une qui est particulièrement spécieuse : c'est celle que suggère la « logique des sciences », telle qu'elle a été constituée dans les vingt dernières années.

Les principes de la thermodynamique sont des lois scientifiques : quelle part de réalité objective renferment-elles ? Les travaux contemporains sur la critique de la science, non contents de s'attaquer à la notion de théorie scientifique, ont voulu passer au crible l'idée de *loi* scientifique, et celle même de *fait* scientifique. On a été jusqu'à soutenir qu'il faut voir dans toute loi scientifique une production de notre esprit, au moins autant que de la réalité qu'il étudie.

Le besoin de mettre de l'ordre dans nos connaissances nous amène à formuler des propositions qui nous permettent l'application du calcul et nous donnent prise sur la nature : ce sont « des postulats créés en vue de l'action, » et s'ils sont vraiment féconds et utiles, c'est qu'ils possèdent la souplesse suffisante

pour se plier à tous les phénomènes et ne jamais redouter l'épreuve de la contradiction avec les faits.

Le fait lui-même, du moins le *fait scientifique*, n'est pas une chose aussi objective que le vulgaire le croit.

M. Duhem a, très clairement, montré qu'« une expérience de physique est l'observation précise d'un groupe de phénomènes, *accompagnée de l'interprétation des phénomènes;* cette interprétation substitue aux données concrètes, réellement recueillies par l'observation, des représentations abstraites et symboliques qui leur correspondent en vertu des théories que l'observateur admet ».

Quand on dit, par exemple, que, dans une expérience, tel gaz a été soumis à telle pression, ce qu'on a vu et constaté, c'est que, dans un viseur, l'image d'une surface de mercure affleurait à certains traits ; bien plus complexe est l'idée abstraite de la pression supportée par le gaz; or, ce que l'expérimentateur nous a transmis de son expérience, ce n'est pas le récit pur et simple des faits qu'il a observés, ce sont « des symboles abstraits que les théories admises lui ont permis de substituer aux documents concrets qu'il avait recueillis [1] ».

Il y a donc, déjà, élaboration opérée par l'esprit sur la matière amorphe du « donné », dans le simple énoncé des *faits* scientifiques.

A plus forte raison en est-il de même dans l'énoncé des *lois*. « Les lois, dit M. Le Roy, sont relatives aux conditions de maniabilité de notre pensée. » Et plus loin : « La contingence des lois ressort enfin de la façon même dont elles sont obtenues. *Le physicien veut des constantes :* c'est parce qu'il en veut qu'il en trouve, grâce à une violence ingénieuse qu'il fait subir à la Nature. Il veut des constantes, parce qu'une con-

1. Duhem, *La Théorie physique*, p. 238.

stante est le type même de ces représentations maniables qu'il recherche. Sa volonté d'en trouver lui en fait découvrir, parce qu'il tourmente la pâte informe des faits et en même temps sollicite doucement aux concessions nécessaires les exigences et les habitudes de son esprit...[1] »

N'est-ce pas précisément à un pareil besoin de trouver des constantes qu'est dû l'énoncé du principe de la conservation de l'énergie? Et ne peut-on affirmer que, si nous sommes assurés de ne prendre jamais ce principe en défaut, c'est qu'à tout prendre, il ne constitue qu'une définition?

Il serait beaucoup trop long de discuter ici ce « positivisme nouveau » et de formuler les réserves nécessaires. Quelles que puissent être ces réserves, il n'est pas permis de méconnaître le service rendu à la science et à la philosophie par une doctrine qui est venue, fort à propos, secouer la naïveté d'un certain objectivisme.

Mais, en tous les cas, il est bien intéressant de constater que si la conservation de l'énergie perd de son importance au regard d'une trop sévère « critique des sciences », la dégradation de l'énergie prendrait, au contraire, un relief inattendu. Elle apparaîtrait comme marquant la résistance du monde extérieur, — de ce que M. Le Roy appelle « le Donné », — à entrer dans les cadres où nous essayons de l'enfermer. Aucun savant, et pas même M. Le Roy, en dépit de quelques expressions peut-être équivoques, n'a soutenu que les propriétés réelles du monde n'entrent pour rien dans la constitution de la science que nous en avons, et que notre esprit n'est pas limité par des obstacles extérieurs dans la liberté de ses démarches pour organiser la connaissance scientifique. La dégradation de l'énergie serait un de

1. Le Roy, *Revue de Métaphysique et de Morale*, septembre 1899, p. 73.

ces obstacles, aperçu d'abord par le sens commun, et, par la suite, imposé par ce sens commun à une science qui essayait de ne pas le voir.

Nous l'avons dit à propos de la loi de Kirchhoff sur l'émission, et à propos de la loi de la dégradation de l'énergie chimique : lors même que ces lois viendraient à être discutées et regardées comme des tautologies, il serait toujours possible, sinon facile, de leur reconnaître un caractère objectif, et d'y déceler au contraire une résistance des choses, et comme une violence faite à notre science, en dépit de ses artifices pour trouver en notre monde mobile quelque chose de permanent, par une réalité plus forte que nous.

Et la proclamation de la loi de dégradation paraît bien répondre à une intuition autrement profonde, et autrement indépendante de tout symbolisme, que la proclamation de la loi de conservation.

## § 2. — LA DÉFINITION DE LA CHUTE LIBRE ET LA DÉFINITION DE L'ÉNERGIE.

Dans le chapitre de son livre sur la *Théorie physique*, où il discute cette proposition de M. Le Roy, qu'une loi physique n'est bien souvent qu'une définition, M. Duhem analyse très finement la question du désaccord possible entre l'expérience et un système de lois, tel que les lois de la chute des corps. Ce qu'il dit de ce problème particulier pourrait être, presque mot pour mot, appliqué au principe de la conservation de l'énergie.

« Nos observations quotidiennes, dit M. Duhem[1], nous ont fait connaître toute une catégorie de mouvements que nous avons rapprochés les uns des autres sous le nom de mouvements des corps graves; parmi ces mouvements se trouve la chute qu'éprouve un

1. *La Théorie physique*, p. 344.

corps grave lorsqu'il n'est gêné par aucun obstacle. Il en résulte que ces mots : « chute libre d'un corps grave » ont un sens pour l'homme qui fait appel aux seules connaissances du sens commun, qui n'a aucune notion des théories physiques.

« D'autre part, pour classer les lois des mouvements dont il s'agit, le physicien a créé une théorie, la théorie de la pesanteur, application importante de la mécanique rationnelle ; en cette théorie, destinée à fournir une représentation symbolique de la réalité, il est également question de « chute libre d'un corps grave » ; par suite des hypothèses qui supportent tout ce schéma, une chute libre doit être nécessairement une chute uniformément accélérée.

« *Les mots « chute libre d'un corps grave » ont maintenant deux sens distincts*. Pour l'homme ignorant des théories physiques, ils ont leur signification *réelle*, ils signifient ce que le sens commun entend en les prononçant ; pour le physicien, ils ont un sens *symbolique*, ils signifient « chute uniformément accélérée ». La théorie n'aurait pas rempli son but si le second sens n'était point le signe du premier, si une chute, regardée comme libre par le sens commun, n'était pas une chute d'accélération uniforme, ou *à peu près* uniforme, les constatations du sens commun étant essentiellement, nous l'avons dit, des constatations dénuées de précision.

« Cet accord, faute duquel la théorie eût été rejetée sans plus ample informé, se produit ; une chute que le sens commun déclare à peu près libre est aussi une chute dont l'accélération est à peu près constante. Mais la constatation de cet accord, grossièrement approximatif, ne nous contente pas... Nous combinons des appareils plus précis et nous constatons qu'une certaine chute, regardée comme « libre » par le sens commun, a une accélération légèrement variable. La proposition qui, dans notre théorie, donne

son sens symbolique au mot « chute libre » ne représente pas avec une exactitude suffisante les propriétés de la chute réelle et concrète que nous avons observée.

« Deux partis s'offrent alors à nous. En premier lieu, nous pouvons déclarer que nous avons eu raison de regarder la chute étudiée comme une chute libre, d'exiger que la définition théorique de ces mots s'accorde avec nos observations ; dans ce cas, puisque notre définition théorique ne satisfait pas à cette exigence, elle doit être rejetée ; il nous faut construire une autre mécanique sur des hypothèses nouvelles, mécanique dans laquelle les mots « chute libre » signifieront non plus « chute uniformément accélérée », mais « chute dont l'accélération varie suivant une certaine loi ».

« En second lieu, nous pouvons déclarer que nous avons eu tort d'établir un rapprochement entre la chute concrète que nous avons observée, et la chute libre symbolique définie par notre théorie ; que celle-ci était un schéma trop simplifié de celle-là ; que, pour représenter convenablement la chute sur laquelle nos expériences ont porté, le théoricien doit imaginer non plus un grave tombant librement, mais un grave gêné par certains obstacles, tels que la résistance de l'air... Nous pouvons chercher à éliminer, par des *corrections* convenables, les *causes d'erreur*, telles que la résistance de l'air, qui influaient sur notre expérience.

« M. Le Roy affirme que nous prendrons le second parti et non le premier ; en quoi il a assurément raison. Les causes qui nous dicteront cette détermination sont aisées à apercevoir. En prenant le premier parti, nous serions obligés de détruire de fond en comble un très vaste système théorique qui représente d'une manière très satisfaisante un ensemble très étendu et très complexe de lois expérimentales. Le second parti, au contraire, ne fait rien perdre du terrain déjà conquis à la théorie physique ; de plus, il a

réussi dans un si grand nombre de cas que nous sommes fondés à escompter un nouveau succès. Mais dans cette confiance accordée à la loi de la chute des graves, nous ne voyons rien d'analogue à la certitude que la définition géométrique tire de son essence même...

« Mais ce qui pousse le physicien à agir ainsi, ce n'est point une nécessité logique ; en agissant autrement, il pourrait être maladroit ou mal inspiré ; il ne marcherait pas, pour cela, sur les traces du géomètre assez insensé pour contredire à ses propres définitions ; il ne ferait rien d'absurde. Il y a plus ; un jour peut-être, en agissant autrement, en refusant d'invoquer des causes d'erreur et de recourir à des corrections pour rétablir l'accord entre le schéma théorique et le fait, en portant résolument la réforme parmi les propositions qu'un commun accord déclarait intangibles, il accomplira l'œuvre de génie qui ouvre à la théorie une carrière nouvelle... »

Appliquons la même analyse à une expérience dans laquelle la définition de l'énergie, et non plus celle de la chute libre, soit en question. Faisons osciller un pendule : nous savons qu'il présentera des alternatives de transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique, et d'énergie cinétique en énergie potentielle : la somme des deux restant constante. A côté de ce pendule établissons-en un second, qui puisse, dans ses oscillations, choquer le premier. Supposons-les tous deux parfaitement élastiques. Ce seront, par exemple, ainsi que dans une expérience classique de Hirn, un lourd cylindre d'acier et un gros bloc de grès des Vosges : tous deux sont suspendus au plafond par des chaînes qui leur permettent un balancement dans un même plan vertical. Le marteau d'acier vient-il à choquer l'enclume mobile de grès, celle-ci est soulevée et commence à son tour des oscillations, tandis que le marteau d'acier rebondit à une hauteur

moindre que celle d'où il était parti, car il a cédé à l'enclume une part de son énergie. Mais après comme avant le choc, la somme des quatre termes constitués par les énergies cinétiques et potentielles des deux masses garde une valeur invariable. Le système des deux pendules est encore *conservatif*.

Entre le marteau et l'enclume, suspendons un morceau de plomb. Le plomb est mou. Dans le choc des deux masses, ce plomb est écrasé. Il y a perte de force vive, et, après le choc, la somme des quatre termes qui donne l'énergie du système des pendules est moindre qu'auparavant. Le système des deux pendules, en y adjoignant la masse de plomb, ne cadre plus avec l'idée instinctive que nous nous faisons d'un système conservatif.

Deux partis, comme précédemment, s'offrent alors à nous. Nous pouvons déclarer en premier lieu que nous avons raison de regarder, néanmoins, le système comme étant toujours un système conservatif ; dans ce cas, il nous faudra changer la définition de l'énergie d'un système ; nous n'avions fait entrer en ligne de compte, dans notre définition primitive, que les deux formes de l'énergie considérée en mécanique pure : l'énergie d'attraction et celle de mouvement. Nous constatons ici que la somme de ces énergies a diminué dans notre système. Mais il est apparu autre chose : le plomb s'est échauffé. En convenant de faire entrer en ligne de compte, dans l'énumération des énergies du système, la chaleur dégagée à son intérieur et de l'accepter comme équivalente à un certain nombre de kilogrammètres par calorie, nous maintiendrons au système la propriété d'être conservatif ; mais nous changeons, par le fait même, et très profondément, la définition de l'énergie.

Nous pourrions, en second lieu, déclarer au contraire que l'idée vulgaire de l'énergie est concrétisée dans les exemples empruntés à la mécanique pure, et est

invariablement attachée à la possibilité de tirer d'un corps matériel du travail utile ; que, dès lors, si l'expérience nous apprend que cette énergie utile ne se conserve pas dans un ensemble matériel qui comprend des corps mous, nous n'avons qu'à en prendre acte, à signaler la « cause d'erreur », qui est ici l'apparition de la chaleur, mais que nous n'avons pas le droit de donner de l'énergie une définition ne répondant plus à l'idée habituelle qu'on s'en fait.

C'est pourtant ici la première alternative qui a été adoptée. C'est le premier parti qui a prévalu parmi les physiciens. On a conservé en physique celle des deux définitions possibles de l'énergie qui rend, par définition, conservatif tout système fermé. Mais on n'a pu empêcher — et l'on n'a pas toujours cherché à empêcher — le grand public de s'en tenir à la définition usuelle.

Dans le choix fait entre les deux alternatives, on n'a pas agi sans raison. D'abord, ainsi qu'on l'a vu, lors de l'introduction du mot *énergie* en thermodynamique par lord Kelvin, c'est expressément dans le sens scientifique que ce mot fut employé, c'est-à-dire dans le sens impliquant le caractère conservatif d'un système fermé. Le sens usuel du mot énergie n'était pas consacré encore, et le droit à fixer le sens d'un terme nouveau en science restait entier.

Mais il n'est pas toujours sage d'aller jusqu'au bout de son droit. Le sens usuel qu'allait prendre le mot *énergie* était à ce point déterminé, et il était si évident que le mot énergie allait signifier ce qu'on avait précédemment nommé « la puissance motrice », que, dans les premiers temps, Thomson et Rankine eux-mêmes se surprenaient à employer le mot « énergie » en ce sens usuel.

Un motif, meilleur, légitime le choix qui a été fait entre les deux sens possibles du mot énergie. C'est le fait de l'équivalence de la chaleur et du travail ; dans

l'expérience de Hirn sur l'écrasement du plomb, la chaleur qui apparaît est toujours proportionnelle à l'énergie mécanique disparue : le rapport qui existe entre ces deux grandeurs reste indépendant des circonstances dans lesquelles se fait l'échange, et sa constance nous apparaît bien comme quelque chose qui s'impose à nous, loin d'être créé par nous. Cette constance rend possible la définition scientifique de l'énergie.

Nous sommes ramenés ainsi à ce problème des deux sens contradictoires donnés au mot *énergie*. Le premier chapitre de cet ouvrage en signalait l'importance. On a plus tard essayé d'en fixer les origines historiques. On voit ici quel aspect nouveau du problème nous révèle la *critique des sciences*.

### § 3. — LA DÉGRADATION DE L'ÉNERGIE S'IMPOSE COMME UNE RÉSISTANCE DE LA RÉALITÉ A NOS CONVENTIONS.

Sans souscrire à toutes les thèses de M. Le Roy, — ni même aux thèses, singulièrement plus modérées, de M. Duhem, — on ne peut s'empêcher d'établir une différence entre cette création de notre science qu'est la *conservation de l'énergie* ou la notion même d'*énergie*, et d'autre part l'idée, si familière au sens commun non prévenu, de la disparition progressive de la *capacité de produire du travail* dans les systèmes livrés à eux-mêmes : vérité imposée par le sens commun, et, après coup, introduite dans la science, mais dont la science avait un instant obscurci la vue, donnant raison à la remarque de Pascal : « Trop de vérité nous étonne ; les premiers principes ont trop d'évidence pour nous ».

Quelque parti que l'on adopte pour définir *la chute libre*, il reste que les corps tombent. De quelque façon que l'on définisse *l'énergie*, il reste que les transformations qu'elle subit en diminuent la valeur, et qu'il y a constamment, dans le monde, quelque chose qui se perd.

## CHAPITRE XXVI

# La lente diffusion de l'idée de dégradation de l'énergie.

---

### § 1. — UNE LACUNE REGRETTABLE : LE DÉFAUT D'OUVRAGES DE VULGARISATION SUR LA DÉGRADATION DE L'ÉNERGIE.

C'est un intéressant problème d'histoire des idées que celui de l'influence de la littérature scientifique sur la science même. Nous avons consacré à ce sujet quelques pages, dans une étude sur la littérature scientifique au XIXe siècle, publiée dans l'*Histoire de la Langue et de la Littérature française* de M. Petit de Julleville. Comme exemple caractéristique d'influence des œuvres d'exposition littéraire sur le développement de la science elle-même, nous avons cité « la diversité d'origine, et, pourrait-on dire, de fortune, des deux principes de la thermodynamique, qui sont, à coup sûr, la plus importante acquisition de la science de la nature inorganique au cours du XIXe siècle :

« Tandis que l'idée de la conservation, énoncée par des savants presque tous étrangers à la France, a été aussitôt saisie et élaborée par la pensée française, tandis que par des traductions de Helmholtz, de Tyndall, de Grove, par les livres de Moigno, par les discours de Dumas, par tous les ouvrages de vulgarisation, elle pénétrait dans la masse, l'idée de la dégradation n'est pas encore répandue en France.

Des ouvrages où sont traitées de hautes questions de philosophie des sciences, tel l'*Essai sur la philosophie des sciences* de M. de Freycinet, ne font pas mention du principe de la dégradation de l'énergie.

« Et ce serait se tromper gravement, que de croire que ces différences ne laissent pas de trace dans l'histoire de la science même. En 1867, Desains, auteur de mémoires à bon droit classiques sur la chaleur rayonnante, était chargé d'un rapport sur les progrès de la science de la chaleur en France depuis le commencement du siècle : à aucun endroit, il ne cite le nom de Sadi Carnot. Quelques années plus tard, le physicien anglais Rankine pouvait reprocher justement aux chimistes français de prouver, par ceux de leurs travaux qui touchaient à la physique, leur ignorance du principe de Carnot. »

Depuis que ces lignes ont été écrites (1899), la situation s'est heureusement modifiée. L'idée de la dégradation de l'énergie tient aujourd'hui une place croissante, non seulement dans les mémoires des spécialistes, mais dans les écrits des savants que préoccupent, avant tout, les applications industrielles. Elle semble avoir acquis droit de cité dans le domaine de la spéculation philosophique. Elle a été introduite dans l'enseignement élémentaire, et figure explicitement dans le programme du baccalauréat.

S'il nous manque encore, sur ce sujet, des ouvrages français de haute vulgarisation, et si nous n'avons, à cet égard, rien de mieux que les traductions françaises des ouvrages anglais de Balfour Stewart, de Maxwell ou de Tait [1], du moins les exemples se multiplient de l'introduction progressive de la notion de dégradation de l'énergie dans les divers domaines de la pensée.

1. J'ai indiqué ailleurs que, si je ne fais pas mention ici des beaux ouvrages de M. Duhem, c'est parce que, chez lui, l'idée de la dégradation de l'énergie est toujours associée à la lutte contre le mécanisme.

Nous venons de citer quelques physiciens anglais. Ce n'est pas uniquement en France que l'idée de la dégradation de l'énergie a été longue à se répandre, c'est aussi en Angleterre. Je n'en veux pour preuve que l'article que consacrait Rankine, en 1867, à se plaindre de l'absence d'ouvrages de vulgarisation relatifs à la seconde loi de la thermodynamique :

« La thermodynamique est une science moderne fondée sur deux lois, dont la première consiste dans la convertibilité de la chaleur en puissance mécanique, et de celle-ci en chaleur, tandis que la seconde détermine l'étendue ou la mesure de la conversion réelle dans des circonstances données. On peut dire que, dans le cours de ces dernières années, la première loi a été *vulgarisée;* maintes fois on en a fait le texte de publications diverses, de cours publics, conçus en vue de captiver l'intérêt par la clarté des explications et le prestige d'une parole élégante, par des expériences intelligibles aux personnes peu familiarisées avec les abstractions des théories scientifiques.

« La seconde loi, non moins importante que la première, reconnue, elle aussi, presque dès la même époque, comme un principe fondamental et absolument essentiel de la nouvelle théorie, a été beaucoup moins considérée par les vulgarisateurs (que nous ne voulons pas confondre avec les auteurs d'ouvrages didactiques); et il en résulte que la plupart des personnes qui ne puisent pas à d'autres sources leur instruction scientifique restent dans l'ignorance de cette loi, dont elles ne soupçonnent même pas l'existence. Pour cette dernière raison, le mal est pire qu'une ignorance absolue : si une demi-science n'a pas de danger en elle-même, c'est à la condition qu'on sache bien que ce n'est pas la science complète.

« Je n'ai pas la prétention de combler ici une *lacune regrettable*, je me borne à la signaler aux hommes doués du précieux talent de vulgarisation.

J'indique les motifs qui peuvent les porter désormais à comprendre également, et au même titre, les deux lois générales de la thermodynamique dans ces expositions lucides qui s'adressent principalement aux gens du monde...[1]. »

## § 2. — LA TÉNACITÉ DE L'IDÉE FAUSSE DE CONSERVATION UNIVERSELLE.

Quelle est la raison profonde de cette « lacune regrettable », encore incomplètement comblée aujourd'hui? Je cite l'absence de littérature scientifique sur le sujet. Mais c'est cette absence même qu'il s'agirait d'expliquer. A coup sûr, il eût suffi d'une individualité puissante qui s'imposât la tâche précise que définissait Rankine, pour vulgariser la dégradation de l'énergie. Il eût suffi qu'un Tyndall écrivît un petit livre analogue à la « Chaleur mode de mouvement » pour que ce livre, traduit partout, eût informé l'opinion universelle. Comment est-il advenu que cette œuvre nécessaire n'a pas trouvé d'ouvrier?

Il n'est pas superflu de le redire. C'est que l'idée de la dégradation, quand elle a reparu, au milieu du XIXe siècle, sous sa forme scientifique, a trouvé, dans les esprits, la place prise.

Elle s'est heurtée à ce « mysticisme d'un genre spécial » dont parle Ernst Mach dans son *Histoire de la Mécanique*, qui portait les savants et les philosophes à ne voir, dans le monde matériel, que les principes de durée.

« Les idées de l'invariabilité de la quantité de matière, de la constance de la somme des quantités de mouvement, de l'indestructibilité du travail ou de l'énergie, qui gouvernent aujourd'hui toute la science

1. Macquorn Rankine. De la nécessité de vulgariser la seconde loi de la thermodynamique, *Ann. Ch. et Phys.*, 5e série, XII, 258.

physique, doivent elles-mêmes naissance à l'influence des conceptions théologiques. Elles ont leur source dans cette proposition, exprimée par Descartes dans ses « Principes de la philosophie », suivant laquelle la quantité de matière et la quantité de mouvement créées à l'origine sont invariables, car, seule, leur immortalité peut s'accorder avec la stabilité du Créateur de l'univers. Les idées sur la façon d'évaluer la somme de ces quantités de mouvement se sont notablement modifiées de Descartes à Leibnitz, et, plus tard, chez leurs successeurs; peu à peu, il en est résulté ce que l'on appelle aujourd'hui « principe de la conservation de l'énergie », mais ce n'est que fort lentement que le vieux fonds théologique a disparu. Bien plus, on ne peut nier qu'à propos de cette loi bien des savants se laissent, actuellement encore, aller à un mysticisme d'un genre spécial[1]. »

Il est bien curieux de constater à quel point cette confiance dans la stabilité du monde physique a survécu, chez plusieurs écrivains contemporains, aux idées philosophiques qui l'avaient certainement suggérée à Descartes ou à Newton; à quel point même, elle est invoquée à l'appui d'idées philosophiques tout opposées. Le monde construit pour la durée, ne s'usant pas, ou réparant de lui-même les fêlures qu'on y découvre : quel beau thème à développements oratoires! mais ces mêmes développements, après avoir servi au XVII^e^ siècle à prouver la sagesse d'un Créateur, ont servi de nos jours d'argument à ceux qui prétendent s'en passer. Il y aurait un joli chapitre d'histoire littéraire à écrire, si l'on voulait, à la façon d'un Brunetière, suivre l'*évolution* de ce *genre littéraire* : « le dithyrambe sur les harmonies de la nature », de Fénelon à Hæckel et du *Traité de l'Existence de*

1. ERNST MACH. — *La Mécanique, exposé historique et critique de son développement*, trad. Émile Bertrand, Paris, Hermann, 1904, p. 427.

*Dieu* aux *Énigmes de la Nature.* A côté des différences, il serait curieux de mettre en relief les analogies, et particulièrement la persistance de cet esprit d'affirmation *à priori*, qui devient tout à fait insupportable chez les théologiens du monisme, alors qu'ils affichent la prétention de dédaigner la théologie.

Dans un article historique sur la *Théorie Mécanique de la Chaleur*, Bohn, professeur à l'Université de Giessen, donnait en 1865 quelques citations bien caractéristiques sur la ténacité de cette idée de « conservation universelle ». Il veut retrouver dans Descartes le germe de l'idée de la conservation de l'énergie, et il ajoute cette phrase significative :

« Si l'idée principale de Descartes ne rencontra aucune opposition, il n'en fut pas de même de sa manière de mesurer la *force* ou l'*énergie*. Leibnitz la combat très vivement dans un article publié en 1685... »

« L'idée principale » qui importe — et sur laquelle on est d'accord depuis Descartes, — celle à laquelle on attribue un intérêt, est l'idée de la *conservation de quelque chose :* savoir quoi est l'accessoire. Mais il faudra attendre M. Henri Poincaré pour voir formuler la conservation de l'énergie sous cette forme, à la fois la plus vague et la plus juste : « Il y a dans le monde quelque chose qui se conserve. »

En attendant, pendant deux siècles, on a proclamé cette *conservation*, sans savoir au juste de quoi, — avec des arguments applicables à la conservation de n'importe quoi, — *et d'où la conviction s'est peu à peu établie que tout se conserve* : « *rien ne se perd* ».

Pour Descartes, c'était la « quantité de mouvement » qui se conservait. Leibnitz, avec raison, substitue à la quantité de mouvement, la force vive. Jean Bernouilli soupçonne que, dans la perte de force vive qui accompagne le frottement, la force vive se transforme, mais se conserve. Et le passage où il

indique cette proposition lui crée des titres indiscutables à une gloire discutable : celle d'avoir, l'un des premiers, confondu « la force vive » avec le « pouvoir d'agir », et affirmé le faux principe de la conservation du « pouvoir d'agir » :

« *Hinc patet vim vivam quæ aptius vocaretur* « *facultas agendi* « (gallice : le pouvoir) » *esse aliquid reale et substantiale quod per se subsistit et quantum in se est, non dependet ab alio... Hinc sponte fluit, vim vivam semper conservari.* »

— « Et voilà pourquoi votre fille est muette ! »

Les inventeurs du principe de l'équivalence ne parlent pas un autre langage.

Écoutons Colding rappeler les idées qui l'ont conduit à sa découverte :

« Les forces sont des entités, des êtres supérieurs et immatériels, très supérieurs à toute chose matérielle; ce n'est que par elles que s'exprime la sagesse que nous apercevons et que nous admirons dans la nature... et par là il est absolument impossible de concevoir que les forces soient quelque chose de mortel et de périssable; il faut donc les regarder comme absolument impérissables... »

Mayer, en 1845, avait pris comme point de départ de sa célèbre dissertation : *Ex nihilo nil fit, nil fit ad nihilum.*

Lorsque Sadi Carnot avait jeté dans ce concert une note discordante, en considérant la « puissance motrice » comme une chose qui n'est pas gratuite et qui se détruit, il n'est pas surprenant qu'il ne fût pas entendu. Bohn, en 1865, déclare que « M. Mayer a *le mérite incontestable d'avoir nié le principe de Sadi Carnot.* » — A nos yeux, Mayer a d'autres mérites.

La phrase de Bohn à cette date, 1865, nous montre quel peu d'influence avaient eu encore les travaux de Thomson et de Clausius, et combien le monde scientifique était resté, dans son ensemble,

fidèle à la rhétorique de la conservation universelle.

Dans sa *Chaleur considérée comme un mode de mouvement*, Tyndall répétait les aphorismes : « Chaque système solaire répand son énergie comme le nôtre, mais toujours sans infraction à la loi, qui voit l'immutabilité dans le changement, qui admet des transformations incessantes, mais sans gain ni perte finale. Cette loi est la généralisation inattendue de l'aphorisme de Salomon : qu'il n'y a rien de nouveau sous le soleil, — en ce sens qu'elle nous apprend à retrouver partout la même puissance primitive dans l'infinie variété de ses manifestations. On ne peut rien ajouter à la nature ; on n'en peut rien retrancher... La loi de conservation exclut rigoureusement et la création et l'annihilation... »

Et Tait avait le droit de reprocher amèrement à Tyndall d'avoir, dans ses leçons, tenu pour non avenue la *dissipation de l'énergie*.

Ces proclamations d'une immutabilité sans perte finale, d'une nature à laquelle on ne peut rien retrancher, couvraient les voix qui affirmaient une dissipation de l'énergie ; et ces voix même répétaient, parfois, comme un écho trop fidèle, les formules des autres. Dans le mémoire fondamental sur la tendance universelle à la dissipation de l'énergie, Thomson déclarait, comme une chose qui va de soi, que l'énergie se conserve, parce qu' « aucune minime parcelle d'énergie ne peut être réduite à néant dans la nature ».

Nous avons montré comment il arrive à Thomson et à Rankine de parler de l'*énergie* comme s'ils entendaient par ce mot la même chose que le public, qui, lui, veut que ce soit la *puissance motrice*, le *facultas agendi*, la *capacity of performing work*, et comment ce double sens du mot *énergie* date des origines mêmes de la thermodynamique.

Désormais la confusion est donc établie dans les

esprits, et pour longtemps. « L'énergie se conserve » ; c'est-à-dire pour le public, l'énergie utile à tirer d'un système matériel isolé se maintient constante.

### § 3. — LA FORME MODERNE DE L'IDÉE DE CONSERVATION UNIVERSELLE.

La confusion une fois levée dans les esprits munis de quelque instruction scientifique, un élément atavique a reparu : la croyance à la possibilité du mouvement perpétuel ; et c'est cet espoir tenace de trouver le mouvement perpétuel, non certes sous la forme naïve de création d'énergie de toutes pièces, mais sous la forme plus raffinée de restauration d'énergie utile, qui inspire inconsciemment les démarches de ceux qui pensent trouver en défaut le principe de la dégradation de l'énergie.

Y parviendront-ils ? Cela est, non pas impossible, mais très peu probable, du moins pour notre « monde individuel », et pour une durée de quelques « ères éternelles ». Jusqu'ici les espérances que l'on avait fondées sur l'intervention des êtres vivants, et, plus récemment, sur les phénomènes radioactifs, pour restaurer de l'énergie utile sans dégradation compensatrice n'ont pas été suivies de succès. La confrontation du principe de la dégradation et du mécanisme semble devoir les laisser subsister tous deux, après qu'on a pu croire que « ceci » tuerait « cela ». Tout nous porte donc à croire que c'est bien une grande et profonde loi naturelle que nous tenons, quand nous affirmons que le monde matériel s'use, et que les phénomènes y deviennent « de plus en plus ternes ». Sans doute, il ne faut pas outrer l'énoncé de cette loi ; il faut soigneusement éviter de parler de « l'entropie de l'univers ». Mais il ne faut pas non plus répéter, ou laisser répéter, la formule mensongère : « Rien ne se crée, rien ne se perd. »

# CONCLUSION

Si l'on passe en revue les diverses formes d'énergie que la nature ou l'industrie nous présentent, on reconnaît qu'il n'est pas indifférent d'avoir l'une ou l'autre de ces formes à notre disposition. La vieille forme, et en quelque sorte la forme type d'énergie, est l'énergie mécanique, celle de l'eau qui s'écoule, celle de l'air jeté par le vent contre les ailes du moulin. Les autres formes d'énergie, ce semble, ne valent pas celle-là, sauf une : l'énergie électrique, et c'est précisément ce qui en fait le prix. Énergie mécanique, énergie électrique, sont des énergies libres.

L'énergie chimique est souvent, en grande partie, de l'énergie libre. Elle ne l'est pas toujours et intégralement. Une énergie libre, sauf le cas de « faux équilibres », est immédiatement utilisable.

Une dose variable d'énergie utilisable se peut extraire de corps matériels qui ne possèdent aucune énergie libre et ne sont riches que d'énergies de qualité inférieure. Dans un espace inégalement chauffé, on peut utiliser les différences de température pour produire du travail : c'est ce que fait la « machine à feu »; mais pas de différence de température, pas de travail. L'équilibre thermique, l'homogène, est stable et stérile.

L'homogène devient instable s'il y a possibilité d'un

état homogène plus stable que le premier. La chaleur d'un système en équilibre thermique peut redevenir utile si le système est mis en présence d'un milieu plus froid. Elle serait même intégralement utilisable en présence d'un milieu refroidi au zéro absolu. Quand on a laissé l'équilibre thermique s'établir dans un système matériel, il a donc perdu quelque chose, mais il est une chose qu'il a conservée. Il n'a plus la même *capacité de produire du travail.* Mais il a gardé la même *énergie.* Si elle n'est plus à notre portée, elle existe toujours. Seulement il n'est plus possible de la récupérer sans dépense.

L'énergie d'un système matériel isolé se conserve, mais se dégrade et se dissipe. Elle se *dégrade*, en ce sens que les formes supérieures se changent tôt ou tard en formes inférieures, que l'avenir d'un monde isolé est l'absence de mouvement, d'électricité et de vie. Elle se *dissipe*, en ce sens que la chaleur accumulée en certains points privilégiés se répand de ces points dans l'espace entier par diffusion ou par radiation. Cette dissipation est une diminution de la valeur du système et une dégradation. L'idée de *dégradation* et le mot lui-même ont attiré plus longtemps notre attention que l'idée et le mot de *dissipation*, en ce qu'ils manifestent mieux, à notre sens, un autre aspect de la vérité que celui que révèle la loi de la conservation de l'énergie, sans toutefois paraître contredire cette loi de la conservation de l'énergie

M. Bouasse, dans une étude sur le rôle des sciences dans l'histoire de la civilisation, remarquait très judicieusement que ce qui importe à l'histoire générale, c'est moins une découverte scientifique que la manière dont elle est comprise par les contemporains. A cet égard, le principe de la conservation de l'énergie a exercé au XIX[e] siècle un prestige prodigieux; mais on peut dire que l'histoire de son influence sur les esprits est bien l'histoire de l'influence d'un faux principe.



Ce qui a séduit les intelligences, ce n'est pas la constance de l'« énergie » définie par lord Kelvin, c'est la croyance à la conservation de la *valeur* d'un monde isolé, et, par extension, de la valeur de l'univers matériel. Ce n'est pas le « rien ne se perd » qu'a démontré la Physique, *tout au contraire*. L'action générale de la Physique sur les idées a néanmoins été celle d'une science qui aurait démontré que « rien ne se perd ».

Quand il est devenu évident pour tout esprit cultivé que « quelque chose se perd dans le monde », tandis que des vulgarisateurs incompétents ont purement et simplement nié la vérité qui gênait leurs généralisations, il s'est trouvé une élite qui, sans illusion sur le bien fondé de l'idée nouvelle, s'est laissé entraîner, par ses habitudes d'esprit anciennes, à en atténuer la portée. Si quelque chose se perd chaque jour, a-t-elle dit, cela se retrouvera plus tard; si l'énergie se dissipe, elle se reconcentrera; si le monde marche comme une horloge montée dont le ressort se détend à chaque minute, qui nous dit que le ressort, une fois détendu, ne sera pas dans un état de complète instabilité?

Nous avons dit quelques mots des thèses métaphysiques que l'on a échafaudées sur cette espérance. Elles sont intéressantes, beaucoup moins en elles-mêmes que comme révélatrices d'un état d'esprit. On a eu grand'raison de dire que la véritable science de l'esprit n'est pas la psychologie, mais la métaphysique. En ce sens, cette métaphysique de Spencer et des philosophes qui s'inspirent de lui, restera comme une précieuse indication sur la façon dont certains savants du XIX[e] siècle se sont figuré l'avenir du monde; mais je ne crois pas qu'elle présente un autre intérêt. En tous les cas, il importe de ne pas la confondre avec la vision niaisement optimiste des choses qui, sans remettre à une très lointaine échéance la restau-

ration de l'énergie utile et le retour à l'« hétérogène », se refuse à voir la dégradation présente.

Cette vision optimiste, nous avons essayé d'en signaler le danger. L'idée que la « Nature » est bonne, qu'il n'y a qu'à laisser libre cours au jeu de ses lois, a éloigné de l'homme la pensée qu'il peut la modifier en bien ou en mal, qu'il peut ralentir ou accélérer la dégradation de l'énergie dans le monde matériel.

Quand je vois, sur les pentes raides du puy de Dôme, aux points où une herbe maigre recouvre à peine un sol de domite friable et poudreuse, un troupeau de moutons venir arracher les dernières touffes du gazon protecteur, je pense qu'il y aurait sans doute quelque paradoxe à soutenir que le berger imprévoyant se laisse guider par une notion erronée de la conservation de l'énergie. Et pourtant, n'est-il pas certain qu'il a subi l'influence des idées ambiantes? et cet aphorisme, cent fois répété à l'école et dans tous les ouvrages de vulgarisation, que la Science a démontré que « rien ne se perd », n'est-il pas une tentation, permanente et terrible, de tirer de la terre le plus grand profit immédiat, sans nul souci du lendemain? de se détourner d'une gestion conservatrice pour escompter les « forces conservatrices et toujours présentes » qui viendront « rétablir l'ordre accoutumé »? Quand le torrent, créé par la dénudation des pentes, aura rejoint d'autres torrents, et formé un fleuve capricieux qui dévastera les villages et ensablera les plaines, osera-t-on répéter que, dans le monde, « rien ne se perd »?

FIN

# TABLE DES MATIÈRES

## TROISIÈME PARTIE

## HISTOIRE D'UN PRINCIPE ET D'UN MOT

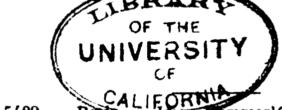


## QUATRIÈME PARTIE

## DÉGRADATION ET MÉCANISME

## CINQUIÈME PARTIE

## LA PORTÉE DU PRINCIPE DE LA DÉGRADATION DE L'ÉNERGIE

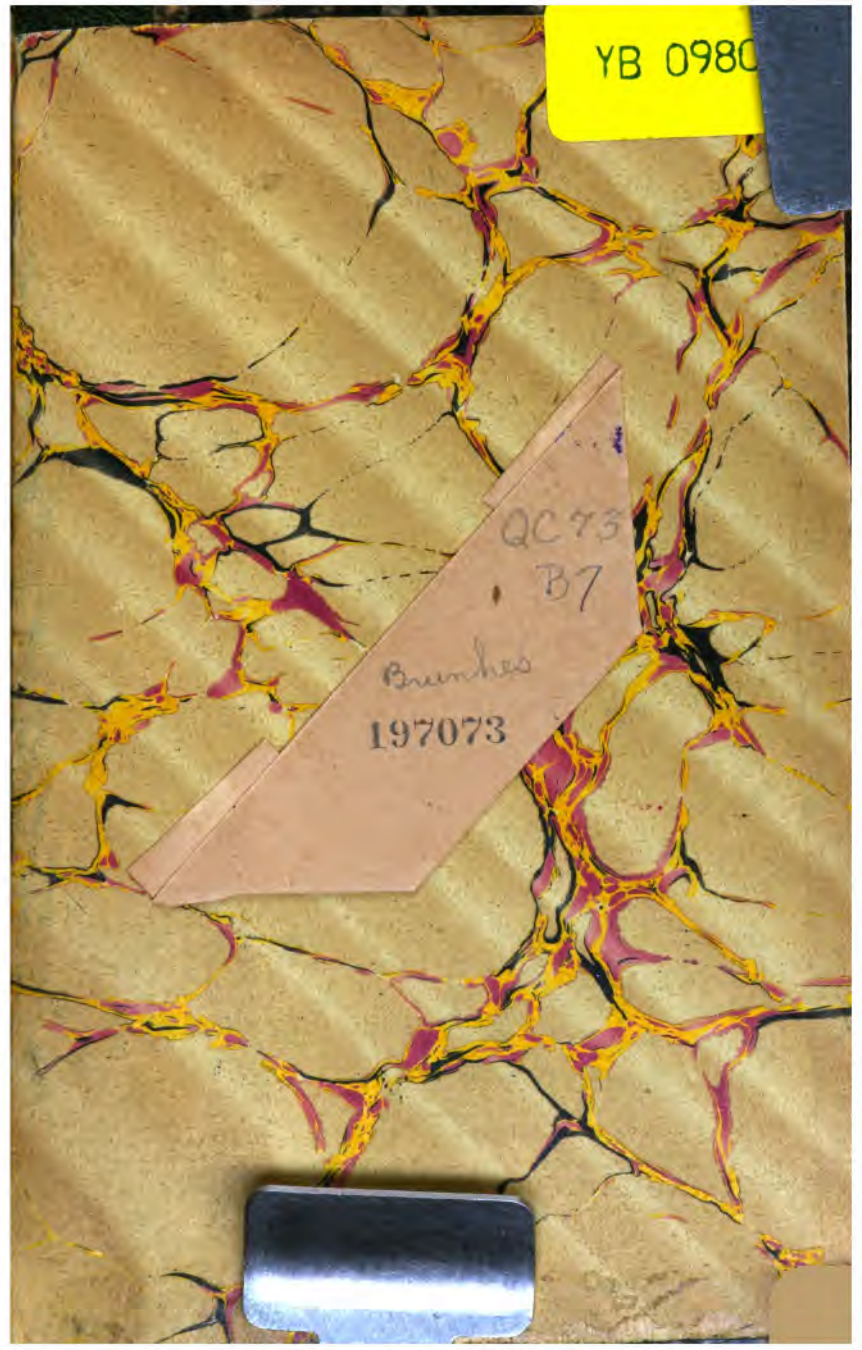



5429. — Paris. — Imp. Hemmerlé et Cie. — 10-08.



---


538. — Paris. — Imp. Hemmerlé et Cie — 3-09.


YB 0980
QC 73
B7
Bruenhes
197073

